

Ottimizzazione del processo di tornitura su centri CNC a cinematica parallela: effetti della lubrificazione, tipologia d'inserto e geometria del particolare sull'usura utensile e finitura superficiale di componenti in acciaio.

Saverio Zitti¹, Roberto Zannini¹, Nick Wälli², Ernst Ulrich Schmitz²

¹Zannini Spa, Castelfidardo, Italia
E-mail: saverio.zitti@zannini.com

²Index-Werke GmbH, Esslingen am Neckar, Germania

Keywords: Cinematica parallela, Inserti Wiper, Rapporto di snellezza, Dry Cutting, Rugosità superficiale, Labbro d'usura, Analisi statistica.

SUMMARY. La tecnologia della cinematica parallela, già applicata con successo su centri di fresatura, può essere impiegata anche su centri di tornitura per il miglioramento del processo di asportazione di truciolo avendo compiuto a monte una corretta definizione dell'utensile e del regime di lubro-refrigerazione.

1 INTRODUZIONE

In fase di definizione del ciclo di lavorazione di componenti torniti, lo studio combinato del sistema “macchina - utensile - componente” è prioritario al raggiungimento dei livelli di qualità e produttività richiesti [1]. L'intero sistema si configura come un circolo chiuso in cui l'utensile ed il componente rappresentano gli elementi di cerniera, in continuo contatto laddove l'asportazione di truciolo si realizza con modalità fortemente influenzate dalla presenza o assenza di liquido lubro-refrigerante. A monte si colloca il sistema macchina, sulla cui struttura portante poggiano da un lato il mandrino responsabile del moto di taglio e dall'altro lato le slitte portautensili responsabili del moto di avanzamento. Tutti i componenti citati contribuiscono al raggiungimento delle prestazioni richieste ovvero contribuiscono con le loro imprecisioni, cedevolezza e vibrazioni a determinare l'errore riscontrabile sul componente finale in seguito al fenomeno di asportazione del truciolo (figura 1).

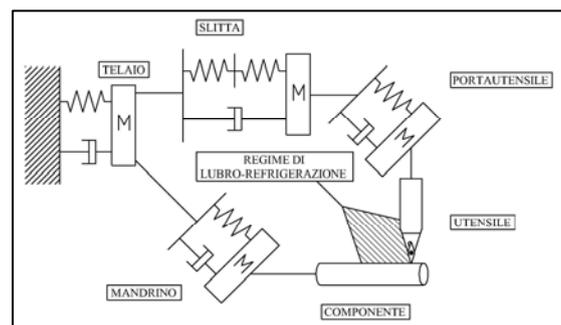


Figura 1: sistema “macchina - utensile - componente”.

2 APPLICAZIONI INDUSTRIALI DELLA CINEMATICA PARALLELA

Le macchine ad architettura cinematica parallela, a volte dette PKM dall'inglese Parallel Kinematics Machines, sono uscite ormai da tempo dai laboratori di ricerca ed attualmente stanno assumendo una sempre maggiore rilevanza industriale ed economica in molti campi applicativi differenti [2]. Tale architettura, detta anche a catena cinematica chiusa, si pone come alternativa alla tradizionale architettura seriale a catena cinematica aperta per l'attuazione di moti sia nel piano che nello spazio. Le differenze tra le due soluzioni sono evidenti all'osservazione: i membri di un meccanismo seriale risultano connessi appunto in serie da coppie cinematiche tipicamente rotoidali o prismatiche e l'intero meccanismo presenta un estremo fisso a telaio mentre quello opposto è libero di muoversi nello spazio; al contrario un meccanismo parallelo consiste in una piattaforma mobile connessa al telaio da varie arti estensibili, in numero pari al numero di gradi di libertà del meccanismo stesso, ciascuno dei quali formato da due membri collegati da una coppia cinematica.

Alla base delle ottime prestazioni dei meccanismi paralleli sta la suddivisione delle forze tra tutte gli arti che supportano la piattaforma, i quali vengono conseguentemente sollecitati in trazione e compressione con quasi totale assenza di flessione vista la natura delle coppie cinematiche presenti. Per questo motivo risulta ridotto il rischio che si realizzi la ben nota condizione di rottura nella quale il carico corrente è maggiore del carico critico. Si ha infatti che:

- il carico corrente agente su ogni arto è come detto pari a una frazione del carico totale;
- il carico critico risulta assai elevato visto che per gli sforzi di compressione (instabilità di forma) esso è proporzionale alla quarta potenza del diametro delle aste.

In definitiva quindi la funzionalità è garantita anche senza grossi dimensionamenti degli organi. La presenza di basse masse in movimento porta con sé diverse conseguenze, tra cui la possibilità di ottenere elevate accelerazioni per il dispositivo terminale.

Quanto alla rigidità delle strutture parallele, essa risulta decisamente elevata in quanto le singole rigidità dei vari arti paralleli si sommano determinando un incremento delle prestazioni complessive del sistema; questo costituisce un aspetto fondamentale vista la differenza rispetto ai sistemi seriali nei quali a sommarsi sono le elasticità degli organi disposti lungo la catena cinematica aperta con conseguenti scarse prestazioni in termini di rigidità della macchina. Il connubio tra basse masse in movimento ed elevata rigidità determina poi alti valori delle frequenze naturali del sistema e conseguentemente un ottimo comportamento vibratorio.

L'accuratezza ottenibile infine è molto elevata, sia per le caratteristiche dinamiche sopra descritte, sia perché gli errori sui vari assi non si sommano tra loro come per le strutture seriali ma vengono mediati; inoltre la buona precisione di posizionamento deriva anche dalle ridotte flessioni, che hanno sempre forti ripercussioni sugli errori.

Nonostante la complessità computazionale del controllo necessario alla gestione delle macchine ad architettura cinematica parallela, il bilancio complessivo delle considerazioni fatte va a loro vantaggio viste le elevate prestazioni in termini di rigidità, potenza, e rapidità.

Di qui la loro applicazione ormai consolidata nell'ambito dei centri di lavoro da parte di diversi grandi produttori del settore: l'inglese Giddings and Lewis pioniera alla EMO di Chicago del 1994 con il robot di fresatura Variax, ma anche le giapponesi Okuma e Toyoda Machine produttrici rispettivamente dei centri di lavoro PM-600 e Hexam Machine, la svedese Ingersoll sviluppatrice delle fresatrici a 5 assi HOH-600 e VOH-1000 e l'americana Hexel con l'esapode Tornado 2000 per operazioni di fresatura [3].

2.1 Applicazioni su centri di tornitura

Nell'ambito dei centri di tornitura il primo esempio di applicazione PKM risale alla EMO di Hannover del 2001 nel corso della quale la Index-Werke GmbH ha presentato la macchina V100 con mandrino verticale mosso mediante meccanismo di pura traslazione a tre arti paralleli [4], macchina frutto di un travaso tecnologico compiuto a partire dal settore dei centri di lavoro.

Nell'ambito dei più diffusi centri di tornitura orizzontali, un'originale applicazione PKM è rappresentata dall'attuazione del moto di avanzamento non più mediante ricorso al classico sistema di più slitte a croce responsabili ciascuna della movimentazione di un asse controllato, bensì tramite un meccanismo planare parallelo di tipo 3-RPR: tre arti, ciascuno dei quali composto da due membri collegati tra loro da una coppia prismatica, sono disposti in parallelo e connessi mediante due coppie rotoidali ad un estremo al telaio della macchina e all'altro estremo alla slitta portautensile (figura 2).

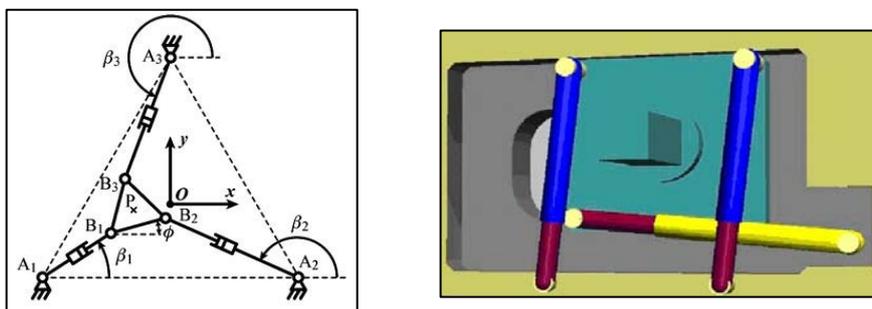


Figura 2: sistema di movimentazione assi a cinematica parallela: schema ed applicazione.

I suddetti arti, disposti asimmetricamente solo per questioni di ingombro ma comunque riconducibili alla disposizione riportata in letteratura, sono attuati mediante viti a ricircolo di sfere e servomotori di costruzione standard così da controllare la posizione e l'orientamento della slitta portautensili sul piano XZ a cui essa è vincolata tramite un sistema di guide piane con struttura "a sandwich" (figura 3).

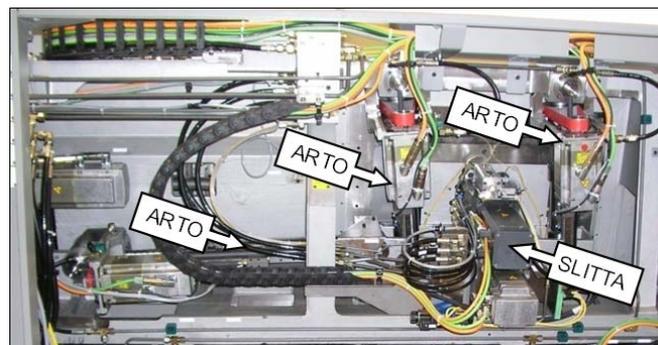


Figura 3: centro di tornitura con sistema di movimentazione assi a cinematica parallela.

Il vantaggio ottenibile dall'applicazione PKM appare evidente se si affiancano gli schemi relativi a un centro di tornitura tradizionale con slitte a croce e ad centro di tornitura innovativo con sistema di movimentazione assi a cinematica parallela: la rigidità del sistema a monte

dell'utensile risulta incrementata dal contributo parallelo degli arti presenti nel sistema di movimentazione assi, per cui il comportamento vibratorio riscontrabile in sede di asportazione di truciolo risulta ottimizzato (figura 4).

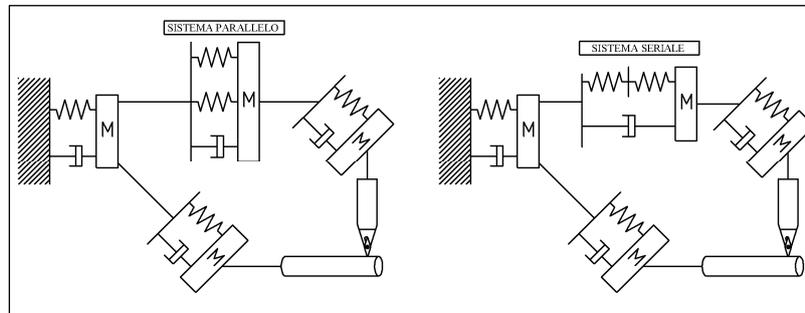


Figura 4: confronto tra sistemi di movimentazione assi parallelo e seriale

La scelta di ricorrere, per l'esecuzione dei test oggetto del presente lavoro, ad un centro di tornitura con sistema di movimentazione assi a cinematica parallela è stata giustificata in una prima fase sperimentale. Si è infatti provveduto alla valutazione delle prestazioni offerte dalla macchina in termini di accuratezza e ripetibilità mediante analisi SPC svolta in riferimento alla realizzazione di un diametro esterno con grado di precisione IT6: a processo stabile, i risultati hanno espresso una Machine Capability pari a $[C_m = 1,78]$ maggiore di $[C_m = 1,67]$ indicato in letteratura come valore oltre il quale le prestazioni di una macchina sono considerate eccellenti.

3 PROCEDURE SPERIMENTALI

Definito il primo componente del già citato sistema “macchina - utensile - componente”, sono stati svolti test multipli per l'identificazione della migliore combinazione tra utensile e regime di lubro-refrigerazione al variare delle caratteristiche geometriche del componente da realizzare. L'attenzione è stata in particolare rivolta a componenti in acciaio aventi la lunghezza come caratteristica geometrica dominante: ne sono un esempio a livello industriale alberi, perni, assi rotanti, ecc..

I test di lavorazione hanno previsto la realizzazione di campioni in acciaio 35SMnPb10 caratterizzati dallo stesso diametro $[D=20\text{mm}]$ ma diversi valori del rapporto tra lunghezza e diametro (rispettivamente $[L/D=3]$ e $[L/D=7]$): tale rapporto, detto anche rapporto di snellezza, riveste un'importanza fondamentale in quanto a parità di diametro un componente più lungo reca un minore valore della rigidezza flessionale (formula 1) con ripercussioni sullo svolgersi del processo di asportazione [5].

$$K = \frac{\pi \cdot ED^3}{64} \cdot \left(\frac{D}{L} \right) = \frac{EJ}{L} \quad (1)$$

Gli effetti della tipologia d'inserto sulla variazione dell'usura utensile e della finitura superficiale dei componenti sono stati valutati mediante ricorso alternativo ad inserti rivestiti di geometria standard (codice ISO CCMT 09T304 PF) e di geometria wiper [6] (codice ISO CCMT 09T304 WF) prodotti dalla Sandvik Coromant, interrompendo la produzione in corrispondenza di

un tempo totale di contatto utensile pari a 30 minuti per ogni test condotto (tempo come criterio di durata inserto). Nel corso dei test, ad ogni incremento di 5 minuti del tempo di asportazione (numero totale di 6 rilevazioni), si è provveduto alla misurazione di:

- il valore di usura per diffusione riscontrabile sull'inserto in termini di larghezza V_b del labbro di usura;
- il valore di finitura superficiale del campione in termini di rugosità media R_a .

Tutti i test sono stati ripetuti sia in presenza di liquido lubrorefrigerante che a secco, mettendo così a confronto i vantaggi tradizionalmente attribuiti al wet cutting (riduzione dell'attrito all'interfaccia utensile – truciolo, limitazione dell'incremento di temperatura nella zona di lavoro, facilitazione della rimozione del truciolo, ecc.) con quelli invece recentemente attribuiti al dry cutting (miglioramento del flusso plastico del materiale a causa proprio dell'incremento di temperatura con ripercussioni positive sulla lavorabilità del materiale e sulla finitura superficiale del componente realizzato) [7].

Di seguito è riassunta l'organizzazione dei test di tornitura svolti (figura 5).

		TIPOLOGIA DI INSERTO				
		WIPER		STANDARD		
CONDIZIONI DI LUBRO-REFRIGERAZIONE	WET CUTTING	L/D=3	V_b	L/D=3	V_b	GRANDEZZE MONITORATE
			R_a		R_a	
		L/D=7	V_b	L/D=7	V_b	
			R_a		R_a	
	DRY CUTTING	L/D=3	V_b	L/D=3	V_b	
			R_a		R_a	
		L/D=7	V_b	L/D=7	V_b	
			R_a		R_a	

Figura 5: organizzazione dei test di tornitura svolti.

4 RISULTATI SPERIMENTALI

I risultati sperimentali hanno evidenziato l'importanza del ruolo svolto dalla tipologia di lubrificazione sull'usura utensile, per cui le migliori prestazioni in termini di usura inserto sono offerte in wet cutting dall'inserto wiper mentre in dry cutting dall'inserto convenzionale. A fronte di questa diversa sensibilità del labbro d'usura al variare del regime di lubro-refrigerazione, risulta che le minori e le maggiori usure in assoluto si ottengono entrambe nel caso di utilizzo dell'inserto convenzionale rispettivamente per $[L/D=3]$ e per $[L/D=7]$ indipendentemente dal fatto di lavorare in condizioni di dry cutting o wet cutting; questo risultato testimonia che in generale le lavorazioni a secco non provocano un aumento evidente dell'usura dell'utensile e talvolta comportano addirittura un incremento della durata dell'inserto (figura 6).

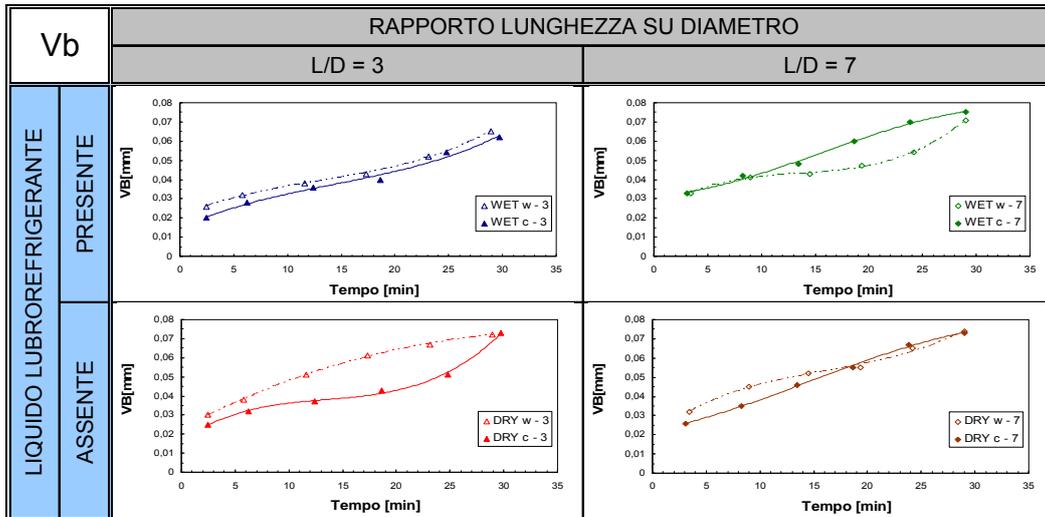


Figura 6: risultati sperimentali in termini di larghezza Vb del labbro di usura.

Nell'analisi dei risultati sperimentali in termini di rugosità media Ra occorre distinguere tra i casi di utilizzo delle due diverse tipologie di inserti.

Nel caso di utilizzo dell'inserto wiper i valori misurati a parità del regime di lubro-refrigerazione variano sulla base del rapporto tra lunghezza e diametro: in particolare sia nel caso wet che nel caso dry la rugosità per [L/D=7] risulta inferiore che nel caso [L/D=3], benché come detto lo spessore medio del labbro d'usura non sia influenzato dal rapporto L/D a parità del regime di lubro-refrigerazione. Il motivo dei diversi risultati ottenuti nelle due situazioni è legato alle modalità con cui l'asportazione di truciolo si realizza proprio nel caso [L/D=3] per il quale a parità di tempo di contatto utensile è stata necessaria la produzione di un maggior numero di pezzi e conseguentemente da parte dell'utensile la performance di un maggior numero di step termici di minore durata e quindi minore entità. Le conseguenze della situazione descritta sono orientate verso un peggioramento delle prestazioni offerte in termini di rugosità del componente in quanto:

- in condizioni dry non si osservano gli attesi vantaggi derivanti dall'addolcimento del materiale poiché l'inserto non riesce probabilmente, nel breve tempo di produzione di un componente con [L/D=3], a raggiungere il benefico regime termico di alta temperatura;
- soprattutto in condizioni dry dove le temperature in gioco sono più elevate piuttosto che in condizioni wet si ha l'insorgere del fenomeno di usura termica dell'inserto, anche a causa del maggior numero di pezzi prodotti ovvero dal maggior numero di cicli termici sostenuti dall'inserto stesso nel caso [L/D=3] piuttosto che nel caso [L/D=7] (figura 7). A tal proposito l'avanzamento dell'usura termica sull'inserto wiper nella produzione in dry di pezzi con [L/D=3] è stata valutata mediante analisi del "Pirocracking factor" (formula 2) definito a partire dalla densità delle cricche di fatica termica $[\rho]$ e dalla relativa lunghezza massima $[P_{max}]$ e media $[l_{med}]$ [8].

$$C = l_{med} \cdot P_{max} \cdot \rho \quad (2)$$

Nei test effettuati si osserva un incremento pressoché lineare di tale parametro ovvero dell'usura termica all'aumentare del tempo di taglio (figura 7).

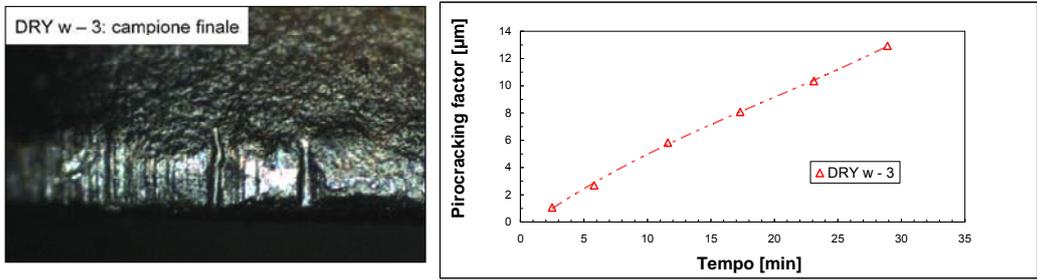


Figura 7: fenomeno di usura termica e andamento del Pirocracking factor.

Nel caso di utilizzo dell'inserto convenzionale non si ha invece insorgenza di usura termica per cui l'andamento della rugosità risulta influenzato soltanto dalla stabilità del componente che è inversamente proporzionale alla snellezza dello stesso. A parità del regime di lubro-refrigerazione, quindi, i valori di rugosità variano in maniera opposta in base al rapporto L/D nei due casi di ricorso all'inserto wiper o all'inserto convenzionale, e in particolare per quest'ultimo si osserva soprattutto nel caso wet ma parzialmente anche nel caso dry una rugosità per [L/D=3] inferiore che per [L/D=7].

Va inoltre osservato che indipendentemente dal tipo di inserto a parità di rapporto di snellezza il regime di lubro-refrigerazione risulta pressoché ininfluenza per [L/D=3], mentre mostra una certa influenza per [L/D=7] caso in cui la rugosità misurata è maggiore in condizioni wet che in condizioni dry. Le ottime prestazioni ottenute in condizioni dry conseguono dal fatto che le maggiori temperature raggiungibili determinano un addolcimento del materiale con il risultato di ottenere una migliore finitura superficiale. Infatti l'aumento locale delle temperature comporta una riduzione della tensione di flusso plastico sul materiale in lavorazione che facilita la formazione del truciolo (figura 8).

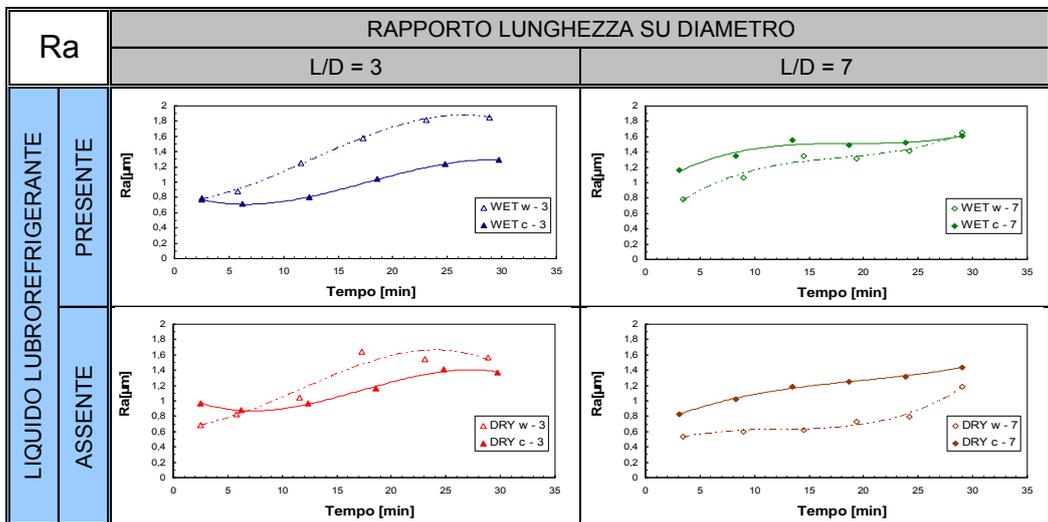


Figura 8: risultati sperimentali in termini di rugosità media Ra.

4.1 Il fenomeno “mat surface”

Un ulteriore test è stato condotto incrementando progressivamente il rapporto di snellezza oltre i valori finora considerati, ed ha evidenziato nel caso di utilizzo dell’inserto wiper l’insorgere di fenomeni vibratorii e conseguentemente l’ottenimento della cosiddetta “mat surface” nella quale risultano visibili i segni lasciati dall’utensile durante l’avanzamento. Come risulta dalla teoria di Albrecht [9], si tratta di un fenomeno derivante dalla vibrazione dell’utensile in direzione normale al moto di taglio con conseguente variazione delle forze di taglio e insorgenza di vibrazioni rigenerative (figura 9).

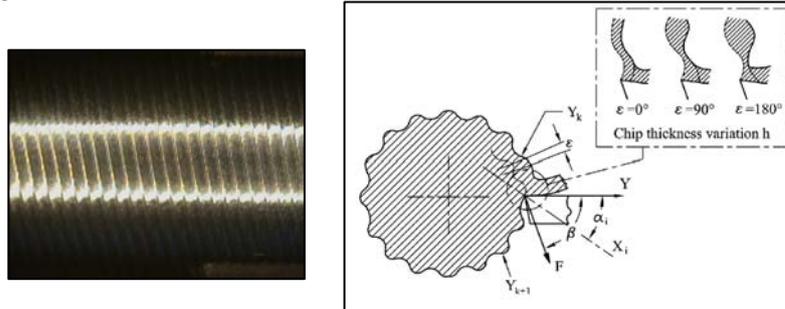


Figura 9: “mat surface” al microscopio e modalità di insorgenza di vibrazione rigenerative.

La variazione delle forze in gioco determina conseguentemente la variazione della velocità di taglio, mentre il flusso plastico instabile del materiale asportato porta alla formazione di un truciolo di spessore variabile e recante sulla superficie esterna delle ondulazioni a denti di sega (figura 10).

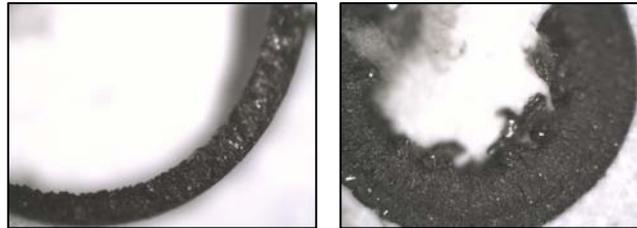


Figura 10: confronto tra trucioli originati in assenza e presenza di vibrazione rigenerative.

Il fenomeno descritto risulta influenzato da:

- la geometria dell’utensile wiper o convenzionale;
- la geometria del componente ovvero il valore del rapporto di snellezza;
- l’entità delle forze di taglio variabile con il valore dell’avanzamento e con il tipo di regime di lubro-refrigerazione;
- il valore della velocità di taglio.

Si sono quindi investigati i risultati di tornitura ottenibili al variare dei suddetti parametri, ed in particolare per rapporti di snellezza rispettivamente pari a $[L/D=9]$, $[L/D=10]$ e $[L/D=11]$ si sono valutate le condizioni molto favorevoli, parzialmente favorevoli e sfavorevoli all’insorgere del fenomeno della “mat surface”. I risultati mostrano l’assenza di fenomeni vibratorii nel caso di ricorso all’inserto convenzionale, mentre nel caso di ricorso all’inserto wiper il fenomeno della “mat surface” risulta sempre evidente al crescere del rapporto di snellezza, ed in particolare allorché la lavorazione risulta compiuta in condizioni wet e con un più basso valore dell’avanzamento (figura 11).

	RAPPORTO SNELLEZZA								RAPPORTO SNELLEZZA								RAPPORTO SNELLEZZA							
	L/D = 9								L/D = 10								L/D = 11							
	TIPOLOGIA DI INSERTO								TIPOLOGIA DI INSERTO								TIPOLOGIA DI INSERTO							
	WIPER				STANDARD				WIPER				STANDARD				WIPER				STANDARD			
	LUBRO-REFRIGERAZIONE								LUBRO-REFRIGERAZIONE								LUBRO-REFRIGERAZIONE							
	WET		DRY		WET		DRY		WET		DRY		WET		DRY		WET		DRY					
	Vc = 250	Vc = 200	Vc = 250	Vc = 200	Vc = 250	Vc = 200	Vc = 250	Vc = 200	Vc = 250	Vc = 200	Vc = 250	Vc = 200	Vc = 250	Vc = 200	Vc = 250	Vc = 200	Vc = 250	Vc = 200	Vc = 250	Vc = 200				
f = 0,08	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green											
f = 0,12	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green											
f = 0,16	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green											
f = 0,20	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green				

Figura 11: casi di insorgenza della “mat surface” al variare delle condizioni sperimentali.

4.2 Elaborazione statistica dei risultati

I risultati sperimentali sono stati elaborati mediante modelli matematici di regressione lineare MRA (figura 12) in modo da poter prevedere i valori di usura utensile e finitura superficiale dei componenti in funzione della geometria stessa dei componenti, della tipologia di lubrificazione e del tempo complessivo di asportazione per ciascuna delle due tipologie di inserti di tornitura [10].

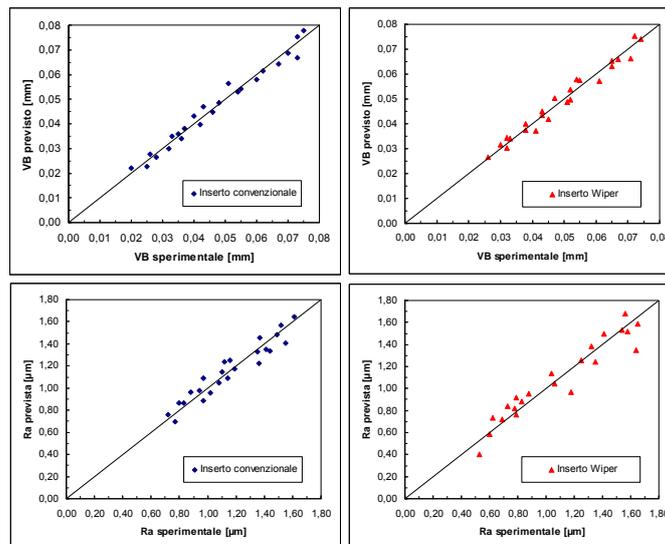


Figura 12: analisi MRA dei risultati sperimentali ottenuti nel caso di inserto convenzionale e wiper relativamente alla larghezza Vb del labbro di usura e alla rugosità media Ra.

I valori ottenuti per il coefficiente di correlazione R^2 e per il coefficiente di correlazione modificato R^2_{adj} sono risultati essere compresi nell'intervallo 0,9÷1 a dimostrazione dell'efficacia dell'analisi di regressione compiuta. Oltre ai valori dei coefficienti appena citati, la valutazione dei residui (delta tra i valori sperimentali ed i valori ottenuti dalla regressione per le variabili

dipendenti) ha evidenziato l'importanza della variabile temporale in assenza della quale si osserva la presenza di un trend. Ciò dimostra il forte contributo che la variabile tempo di lavorazione ovvero stato di avanzamento dell'usura porta alla descrizione della variabilità del fenomeno.

5 CONCLUSIONI

I test, svolti mediante utilizzo di un centro di tornitura con sistema di movimentazione assi a cinematica parallela, hanno permesso di mettere in evidenza gli effetti del regime di lubro-refrigerazione sul labbro d'usura dell'inserto e sulla rugosità superficiale del componente in lavorazione nel caso di tornitura in condizioni wet e dry di alberi in acciaio 35SMnPb10 caratterizzati da un elevato rapporto di snellezza. Si è inoltre voluto evidenziare l'influenza della geometria dell'inserto su tali grandezze, con particolare riferimento alla possibilità alternativa di ricorso ad inserto standard o inserto wiper. I risultati ottenuti possono essere così sintetizzati:

- le minori e le maggiori usure in assoluto si ottengono entrambe nel caso di utilizzo dell'inserto convenzionale rispettivamente per $[L/D=3]$ e per $[L/D=7]$ indipendentemente dal fatto di lavorare in condizioni dry e wet;
- nel caso dell'inserto wiper si osserva, a causa dell'usura termica e del mancato raggiungimento del regime termico, l'aumento della rugosità passando da $[L/D=7]$ a $[L/D=3]$. Al contrario nel caso dell'inserto convenzionale il valore di R_a aumenta al crescere del rapporto di snellezza del componente;
- per rapporti di snellezza maggiori di $[L/D=7]$ si osserva l'insorgere di vibrazioni rigenerative nel caso dell'inserto wiper allorché la lavorazione risulta compiuta in condizioni wet e con un più basso valore dell'avanzamento;
- è stato realizzato un modello MRA per la previsione dei valori di usura e rugosità in funzione del regime di lubro-refrigerazione, del rapporto di snellezza del componente e del tempo di contatto utensile.

References

- [1] F. Giusti, Tecnologia meccanica e studi di fabbricazione, Tipografia Editrice Pisana, Pisa (1976).
- [2] Callegari M., "Considerazioni sulla progettazione delle macchine a cinematica parallela", Progettare V.N.U., **247** (2001).
- [3] <http://www.parallemic.org>
- [4] <http://www.index-werke.de>
- [5] Cooper J., DeRuntz B., "The Relationship Between the Workpiece Extension Length/Diameter Ratio and Surface Roughness in Turning Applications", Journal of Industrial Technology, **23** (2007).
- [6] Sandvik Coromant, "Technical Guide", <http://www.coromant.sandvik.com>.
- [7] Bruni C., Forcellese A., Gabrielli F., Gobbi L., Simoncini M., "Finish Turning under Dry and MQL Conditions", International Journal of Machine Tool & Manufacture, **46**, 1547-1554 (2006).
- [8] Pellizzari M., Molinari A., Straffelini G., "Thermal fatigue resistance of plasma duplex-treated tool steel", Surface and Coatings Technology, **142**, 1109-1115 (2001).
- [9] F. Gabrielli, "Tecnologia meccanica", Pitagora Editrice, Bologna 2004.
- [10] Ozcelik B., Bayramoglu M., "The statistical modeling of surface roughness in high-speed flat end milling", International Journal of Machine Tool & Manufacture, **46**, 1395-1402 (2006).