



Soluzioni innovative nella progettazione di elettromandrini per High Speed Machining e

STABILITÀ DEL PROCESSO DI TAGLIO

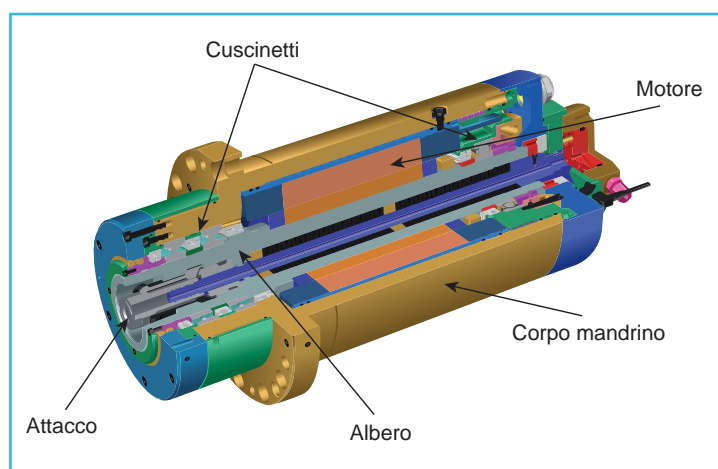
La necessità, per chi produce componenti meccanici principalmente per asportazione di materiale, di una produttività sempre maggiore, ha catalizzato l'esigenza, sia da parte dei costruttori che degli utilizzatori di centri di lavoro, di incrementare le prestazioni complessive del sistema macchina utensile e con esso di tutti i componenti che la costituiscono

Sicuramente non fanno eccezione gli elettromandrini ovvero mandrini in cui l'albero è messo in rotazione da un motore montato all'interno della carcassa (figura 1), ai quali si richiede una capacità di lavorare a velocità sempre più elevate (High-Speed-Machining). L'incremento di prestazioni di un elettromandrino può essere pragmaticamente sintetizzato nel miglioramento della capacità di asportare materiale in modo stabile dal pezzo in lavorazione. In Figura 2 è illustrata una lavorazione di un componente in lega di alluminio nel quale si evidenzia la grande quantità di materiale asportato, in alcuni casi infatti, soprattutto per componenti destinati al settore aeronautico si arriva ad asportare fino l'90% di volume dell'intero grezzo. È chiaro quindi come sia di estremo interesse economico poter asportare materiale il più velocemente possibile ovvero cercare di incrementare il tasso di asportazione di materiale, anche chiamato "MRR Material Removal Rate".

STRUMENTI DI MODELLAZIONE E SIMULAZIONE

Per poter proporre soluzioni progettuali innovative, atte a migliorare il comportamento del mandrino durante la fase di asportazione, è di fondamentale importanza conoscere il più dettagliatamente possibile quali sono i componenti critici del sistema, quali sono le interazioni dinamiche con il processo di

Fig. 1
Elettromandrino –
componenti principali.



PAOLO ALBERTELLI, MICHELE MONNO
POLITECNICO DI MILANO
GIACOMO BIANCHI
ITIA (IST. DI TECNOLOGIA INDUSTRIALI
E AUTOMAZIONE) DI MILANO
CAPELLINI S.R.L.

taglio, come la macchina su cui è montato l'elettromandrino influenza il comportamento del componente stesso e qual è la scelta ottimale dei parametri di taglio. In figura 3 è proposto uno schema che mette in evidenza le parti fondamentali di una macchina utensile e come queste possano interagire determinandone il comportamento complessivo. Sebbene ci si focalizzerà sul mandrino ed ovviamente, per quanto accennato in precedenza, sul processo di taglio, è necessario premettere che le caratteristiche della macchina giocano un ruolo di primo ordine nella definizione delle prestazioni globali del sistema mandrino. Per poter affrontare uno studio così dettagliato del comportamento del mandrino è indispensabile l'utilizzo di strumenti di modellazione e simulazione. E' quindi importante tenere in considerazione, nella fase di modellazione, differenti aspetti:

1) Proprietà statiche e dinamiche dei componenti principali:

- flessibilità strutturale di albero e carcassa;
- effetti giroscopici e centrifughi (legati alla velocità di rotazione) dell'albero e di eventuali componenti aggiuntivi come motori o pulegge;
- contributo strutturale di componenti aggiuntivi (ad esempio il rotore e lo statore del motore elettrico nel caso degli elettromandri);
- il collegamento tra il mandrino e la relativa macchina utensile;
- lo smorzamento introdotto dai vari componenti che costituiscono il mandrino.

2) Il comportamento dei cuscinetti:

- dipendenza della rigidità dei cuscinetti dai carichi applicati in esercizio, dal precarico e dagli effetti termici;
- effetti legati alla velocità di rotazione sulle sfere dei cuscinetti [6](nel caso di cuscinetti con



Fig. 2
Esempio di una lavorazione di un componente in alluminio (Jobs).

corpi volventi) dovuti all'azione centrifuga e giroscopica sulle sfere, evidenziate in Figura 4;

- condizioni di lubrificazione che dipendono dal regime di rotazione;
- possibilità di modellare cuscinetti differenti da quelli con elementi volventi (es. magnetici o ad aria ecc.).

3) Utensile: flessibilità strutturale dell'utensile e attacco utensile.

Esistono in commercio alcuni pacchetti commerciali che permettono di modellare e simulare il comportamento statico e dinamico di mandrini. In generale si basano su tecniche di analisi agli elementi finiti (FEA) ma a differenza dei generici applicativi commerciali FEM sono software dedicati anche se alcuni di questi pacchetti non si rivolgono esclusivamente al settore degli elettromandri

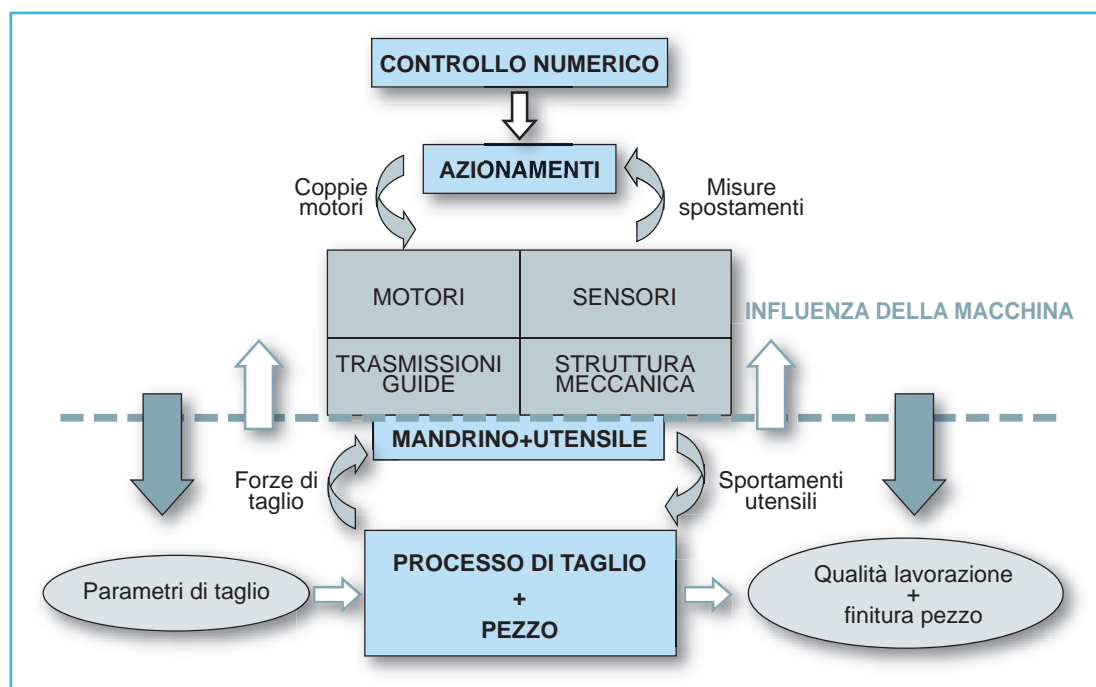


Fig. 3
Modellazione schematica del sistema Macchina Utensile – interazioni tra i componenti.

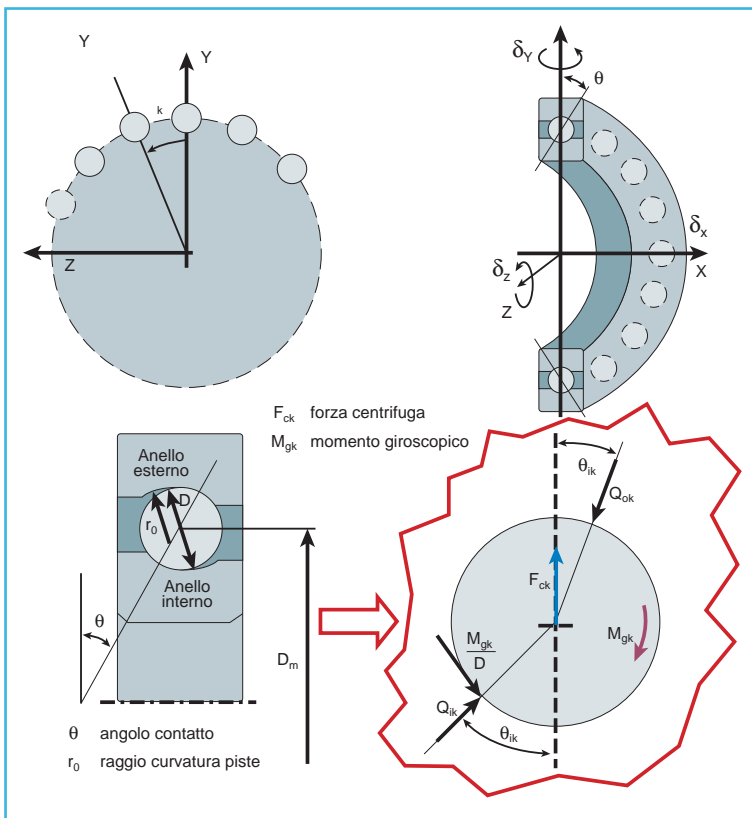


Fig. 4
Geometria del cuscinetto volante-azioni sulle sfere.

ma possono essere impiegati per lo studio più in generale delle turbo-macchine. Le analisi svolte nel presente articolo sono state effettuate con **SpindlePro**[®] [9] che permette di modellare sia la cedevolezza strutturale dell'albero che quella della carcassa attraverso elementi beam ("Timoshenko beam") che inoltre permettono di considerare gli effetti legati alla velocità di rotazione [5]. Il pacchetto permette di calcolare la rigidità dei cuscinetti a sfere, di considerare come questa si modifica in funzione del precarico imposto, del regime di rotazione e delle effettive condizioni di carico. Non sono modellati invece fenomeni termici [3] e

fenomeni legati alle condizioni di lubrificazione. In Figura 5 è mostrato il modello agli elementi finiti di un elettromandrino dell'azienda Capellini S.r.l. [11].

Nel modello sono stati introdotti anche i contributi strutturali di rotore, statore e del sistema di bloccaggio-sbloccaggio utensile. È stata inoltre introdotta la cedevolezza dell'utensile e del relativo sistema di "attacco". La visualizzazione delle sezioni dei vari elementi consente di verificare a colpo d'occhio la geometria del modello, anche se, dal punto di vista strutturale, viene sempre utilizzata una modellazione con soli elementi monodimensionale di tipo trave. È importante osservare che è stata condotta una campagna di prove sperimentali con lo scopo di caratterizzare il comportamento non noto di alcuni componenti (es. il rotore del motore elettrico) e soprattutto per verificare la precisione del modello proposto (fig. 6). In Figura 7 sono illustrate alcune fasi delle prove di analisi modale sperimentale che ha permesso di caratterizzare il comportamento dinamico dei vari componenti del mandrino. I modelli infatti sono stati opportunamente tarati a valle delle campagne sperimentali realizzate.

MODELLO DEL PROCESSO DI TAGLIO

Il comportamento dinamico complessivo della macchina e soprattutto quello del mandrino unitamente all'interazione con il meccanismo di asportazione influenzano notevolmente la qualità delle lavorazioni ottenute. In generale la capacità di asportazione può essere limitata o dalla potenza-coppia disponibili al mandrino o dall'innescio di indesiderati fenomeni vibratorii. Nel caso di asportazioni pesanti, il più importante tra questi è indubbiamente costituito dal chatter, una forma di instabilità

Fig. 5
Modello FEM di un elettromandrino - **SpindlePro**[®].

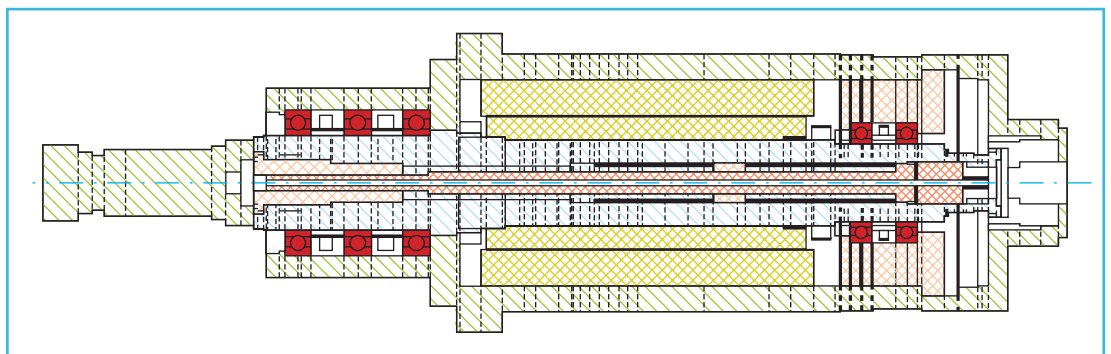
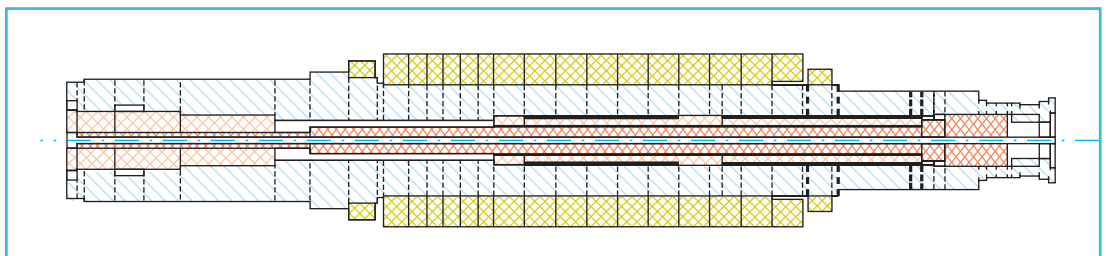


Fig. 6
Modello FEM dell'albero del mandrino.



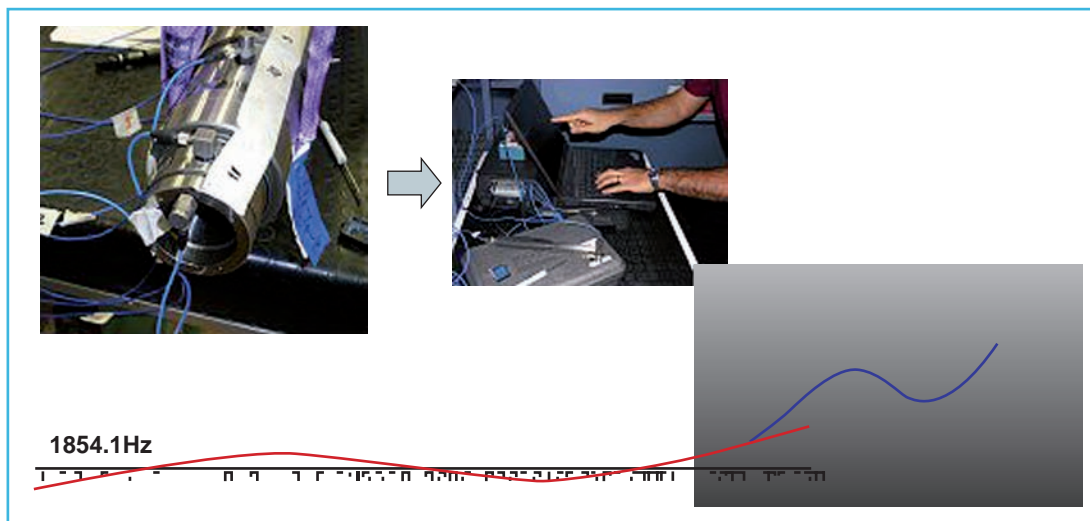


Fig. 7
Set up sperimentale
e forma modale
identificata.

del processo di taglio dovuto ad effetti rigenerativi. L'instaurarsi del fenomeno causa l'innescarsi di vibrazioni tra utensile e pezzo con conseguente peggioramento della qualità della superficie lavorata [4]. Tali vibrazioni auto-eccitate causano un incremento importante delle forze di taglio e determinano una riduzione della vita dell'utensile, un incremento della potenza assorbita nonché aumentano le possibilità di danneggiare componenti particolarmente importanti e costosi del mandrino come ad esempio i

cuscinetti. Facendo riferimento alla Figura 8 si può osservare come a causa di inevitabili disturbi esterni, principalmente dovuti alle discontinuità delle forze di taglio in fresatura, si innescano delle vibrazioni all'utensile. Senza ledere alla generalità del problema, la dinamica del sistema "macchina-mandrino-utensile", indispensabile per la descrizione del fenomeno, può essere considerata utilizzando un modello a due gradi di libertà. Le vibrazioni dell'utensile lasciano sul pezzo una superficie ondulata che verrà incontrata dal tagliente successivo quindi

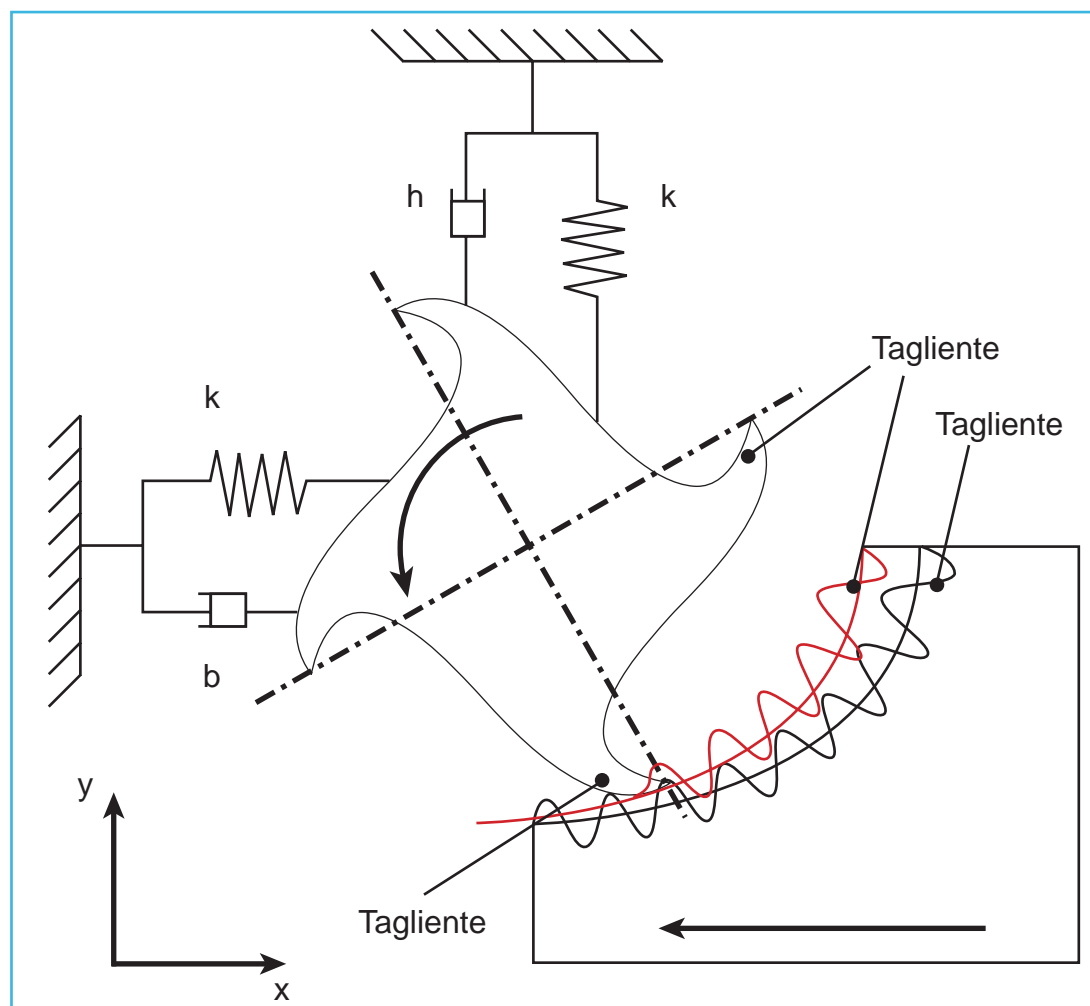


Fig. 8
Schematizzazione
effetto rigenerativo
per lavorazione
fresatura – chatter.

Fig. 9
Andamento della sezione di truciolo in diverse condizioni di taglio.

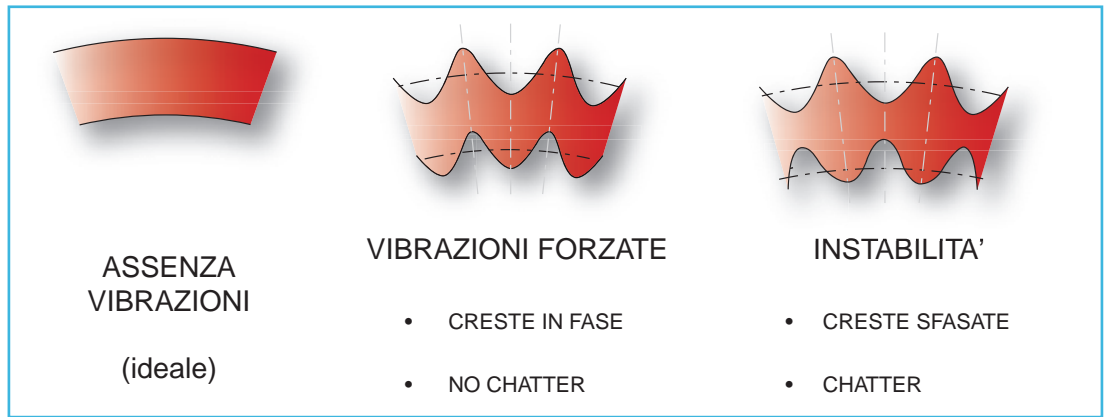
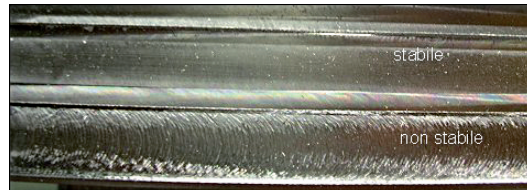
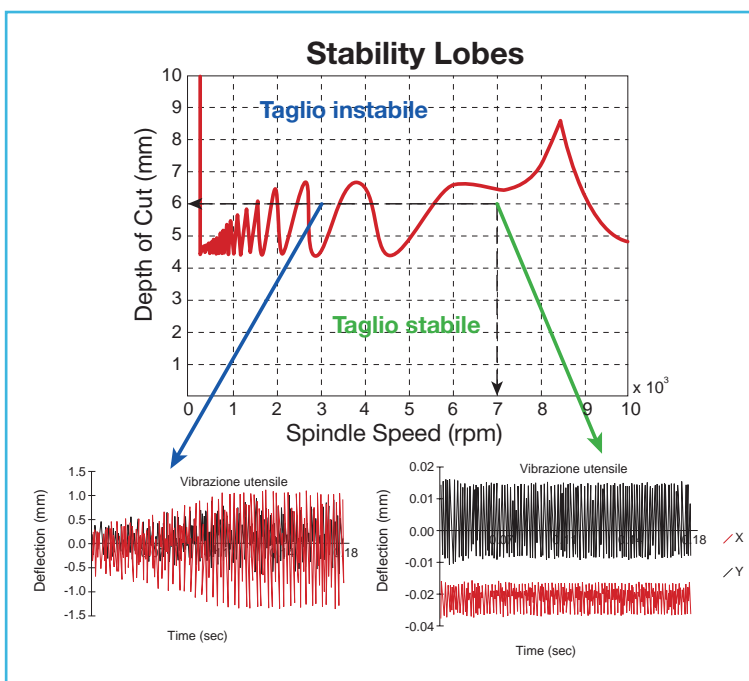


Fig. 10
Effetti sulla qualità della superficie lavorata.



lo spessore istantaneo di truciolo dipende, oltre che dalla posizione attuale del tagliente, anche dall'ondulazione lasciata sul pezzo dal tagliente che ha asportato precedentemente materiale. In questo modo le forze di taglio istantanee dipendono dal valore attuale (al tempo t) e dal valore occorso al tempo $(t - \Delta t)$ dello spostamento relativo tra tagliente e pezzo. La presenza, nel calcolo delle forze di taglio al tempo t , della posizione del tagliente precedente, "letta" con un ritardo Δt è alla base del fenomeno rigenerativo del chatter. Definita la tipologia di lavorazione (tipo di utensile e grado di immersione radiale) e la dinamica della macchina vista all'utensile è possibile che, per alcune condizioni di profondità di passata assiale e di velocità di rotazione del mandrino,

Fig. 11
Diagramma a lobi – lobi di stabilità.



si verifichi l'instabilità da chatter. In Figura 9 sono mostrate alcune diverse situazioni che si possono verificare durante il taglio: la fenomenologia è caratterizzata da uno sfasamento tra la "cresta" generata dal passaggio del dente "i-1" e quella lasciata dal dente successivo "i". La condizione pessima si ha in corrispondenza di uno sfasamento di mezzo periodo, cui corrisponde la massima modulazione dello spessore di truciolo. Il sistema può passare da una situazione all'altra al variare della velocità di rotazione del mandrino, che varia lo sfasamento tra le oscillazioni utensile-pezzo, e la frequenza di passaggio dei taglienti. Se l'utensile oscilla in direzione radiale di un Δr , la conseguente variazione di sezione della sezione di truciolo è legata appunto a $\Delta r \cdot b$ (b profondità di passata). Ne consegue che la profondità di passata modula il "guadagno" tra le oscillazioni relative e la conseguente oscillazione della forza.

Data la dinamica di macchina e pezzo, le condizioni di lavorazione (immersione, geometria utensile e materiale pezzo), la stabilità del sistema dipende da due parametri: la profondità di passata (b) e la velocità di rotazione del mandrino (S). Si può quindi costruire un diagramma, detto "diagramma a lobi" che divide il piano S - b in due zone: una in cui la lavorazione è stabile (al di sotto dei lobi) e una zona in cui si ha una lavorazione caratterizzata dall'instabilità da chatter (sopra i lobi). Questa figura mette in luce, attraverso alcune simulazioni realizzate con CutPro® [9] (uno dei software specifici per lo studio del processo di taglio), gli andamenti delle vibrazioni dell'utensile rispettivamente in condizioni stabili e in condizioni di instabilità da chatter. È evidente come la condizione vada assolutamente evitata soprattutto in relazione alla qualità della lavorazione che ne scaturisce. In Figura 10 è mostrato il confronto relativo alla qualità superficiale di una lavorazione in condizioni stabili ed una in condizioni di chatter, le prove sono state eseguite presso il laboratorio MUSP.

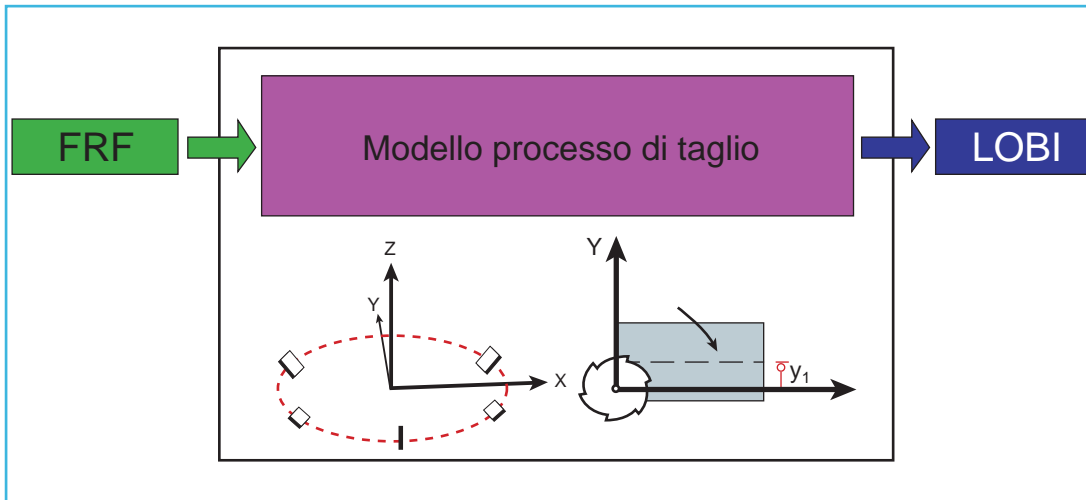


Fig. 12
Definizione delle
caratteristiche della
lavorazione.

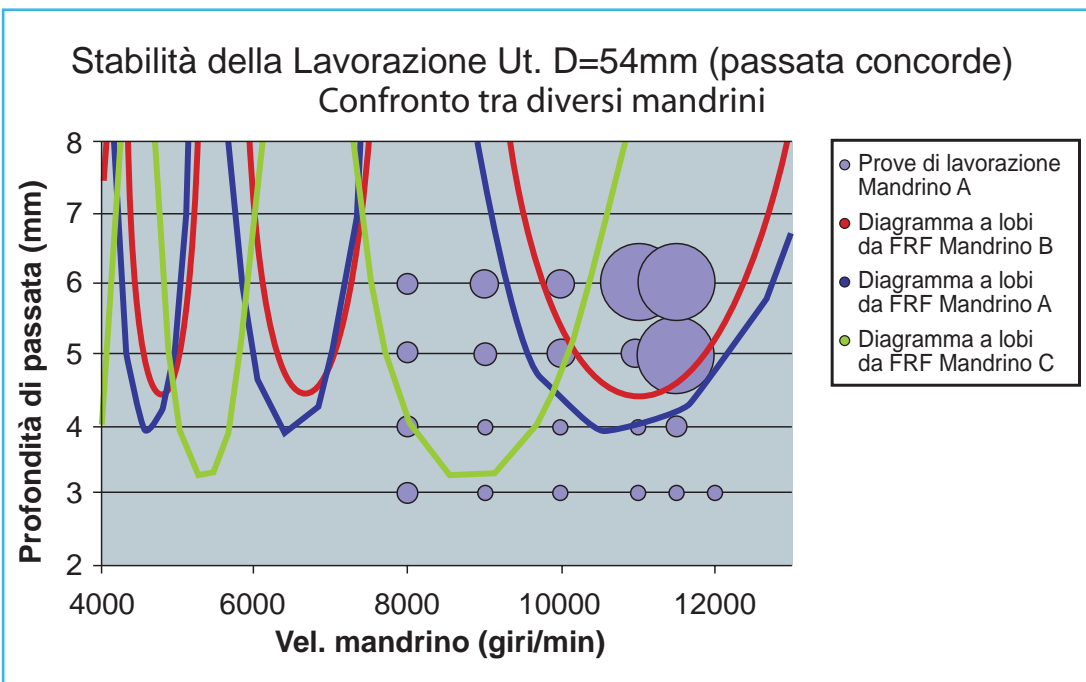


Fig. 13
Diagrammi a lobi e
livelli della
vibrazione durante
differenti prove di
taglio.

DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DIAGRAMMI A LOBI

Esistono pacchetti commerciali che, definendo la dinamica di macchina e pezzo e le condizioni di lavorazione considerate (immersione, geometria utensile, materiale), permettono di stimare l'andamento dei diagrammi a lobi (fig. 12). La cedevolezza dinamica tra utensile e pezzo può essere velocemente misurata sulla macchina utilizzando un accelerometro ed un martello strumentato. In Figura 13 è mostrato il diagramma a lobi ricavato con CutPro® dopo aver effettuato le misure di cedevolezza dinamica [8] su un centro di lavoro. Sono state inoltre fatte delle prove di lavorazione a differenti velocità di rotazione e profondità di passata per poter verificare l'attendibilità delle previsioni delle differenti zone di stabilità-instabilità. In figura 13 si riporta quindi il livello vibrazionale che è stato riscontrato nel corso delle differenti prove di lavorazione, ovviamente ampiezze elevate di vibrazione

testimoniano l'insorgenza del fenomeno del chatter. I risultati delle prove mostrano l'attendibilità dei diagrammi a lobi previsti. Generalizzando si può affermare che, a parità di lavorazione, il limite incondizionato di stabilità ovvero la profondità di passata assiale per la quale si ha stabilità per ogni velocità del mandrino dipende principalmente da alcune caratteristiche dinamiche del sistema ovvero dalla cedevolezza dinamica e dallo smorzamento dei modi di vibrare che coinvolgono l'utensile. In particolare, per lavorazioni ad alta velocità con utensili molto snelli, la capacità è influenzata principalmente dalle caratteristiche del mandrino. Si può affermare che un incremento generalizzato di rigidità dinamica e smorzamento del sistema consente di migliorare la capacità di asportare materiale della macchina, ma dei risultati più mirati ed efficienti si possono ottenere solo valutando l'effetto che una variazione della dinamica produce sui diagrammi a lobi.

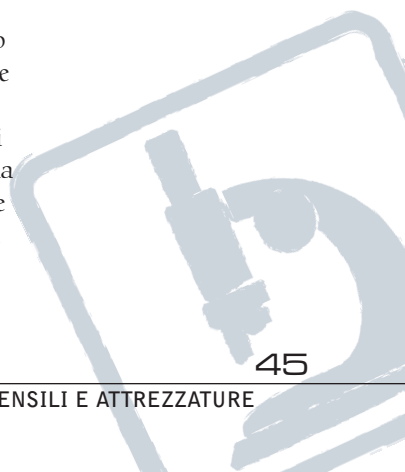
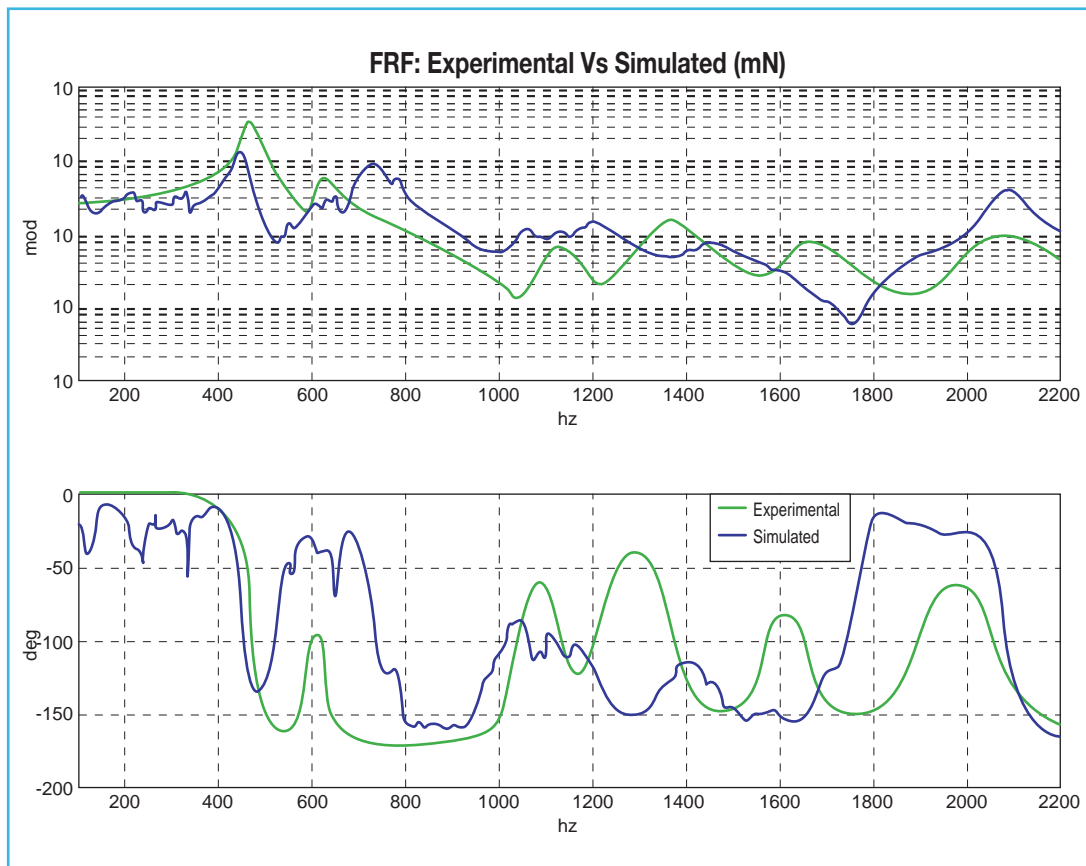


Fig. 14
Funzione risposta in
fequenza della
cedevolezza
all'utensile
(simulata Vs
sperimentale).

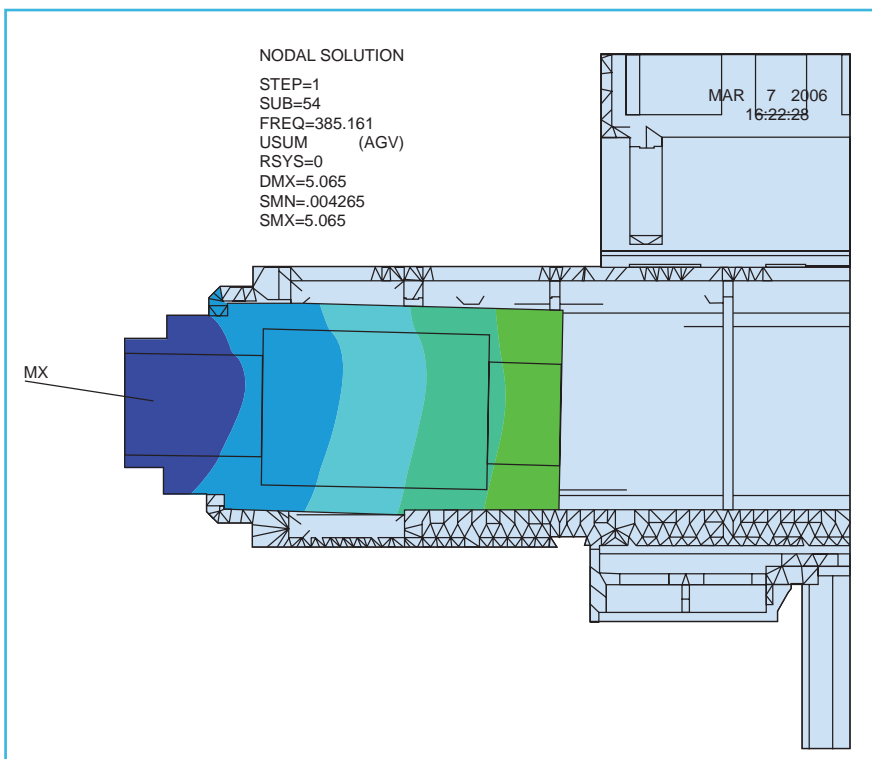


SVILUPPI FUTURI

Nella modellazione fino ad ora adottata il mandrino è stato modellato come vincolato rigidamente a terra. In figura 14 sono però illustrate le differenze rispetto alle misure sperimentali di cedevolezza dinamica riscontrate scegliendo questo approccio. È evidente come le capacità predittive del

modello del mandrino, anche se opportunamente caratterizzato, ammetta alcune limitazioni, potrebbe essere sicuramente interessante integrare i modelli realizzati con modelli semplificati della macchina, Figura 15 e soprattutto cercare di capire come le caratteristiche della macchina possano modificare la dinamica del mandrino. **U**

Fig. 15
Modello FEM di un
mandrino montato
sulla macchina,
ANSYS®.



Bibliografia

- [1] Cao, Y., Altintas, Y. A general method for the modelling of Spindle-Bearing Systems. Department of Mechanical Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- [2] Gagnol, V., Belhassen, C., Bouzgarrou, Ray, P., Barra, C. Dynamic analysis of a high speed machine tool spindle-bearing system. *Multibody dynamics 2005*, Ecomas Thematic 2005.
- [3] Lin, C.W., Tu, J.F., Kamman, J., An integrated thermo-mechanical-dynamic model to characterize motorized machine tool spindles during very high speed rotation. *Int. Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003) 1035-1050.
- [4] Cao, Y., Altintas, Y. Modeling of Spindle-Bearing and Machine-Tool Systems for Virtual Simulation of Milling Operations. *Cirp Annals*, 2006.
- [5] Genta, G. *Dynamics of Rotating System*. Springer, 2005.
- [6] Harris, E. J., *Tedric, A. Rolling Bearings Analysis*. New York, USA: John Wiley & Sons, 2001.
- [7] Altintas, Y. and Budak, E. (1995). Analytical prediction of stability lobes in milling. *Annals of the CIRP*, 44: 357-362.
- [8] Ewins, D.J. *Modal testing: theory, practice and application*. 2. ed. Baldock, England: Research studies, 2000.
- [9] *Manufacturing automation laboratories inc., website*, < <http://www.malinc.com/> >
- [10] *ITIA CNR website*, < <http://www.itia.cnr.it/> >
- [11] *Capellini S.r.l website* <<http://www.capellini.it/>>