



## **CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DI UNA FRESATRICE A CONTROLLO NUMERICO**

A. Bracciali, R. Ciuffi, P. Rissone, M. Toderi

*Dipartimento di Meccanica e Tecnologie Industriali, Università di Firenze, Via S. Marta, 3, 50139 Firenze*

### **SOMMARIO**

E' stato studiato il comportamento dinamico di una fresatrice a 5 assi controllati per individuare le possibili cause che limitano la precisione ottenibile in finitura. Allo scopo è stata eseguita una serie di analisi modali in tre diversi assetti di lavoro della macchina e quindi sono state effettuate campagne per la misura delle vibrazioni sulla tavola portapezzo e sul mandrino sia a vuoto sia durante la fresatura di campioni in alluminio e acciaio per stampi. L'esame dei risultati ha portato a individuare possibili miglioramenti strutturali e cinematici

### **ABSTRACT**

The dynamic behavior of a 5 axes milling machine has been investigated in order to pinpoint possible design characteristics which limit the precision of the final machining. In a first time a series of modal analyses of the complete machine was performed in three working configurations and then table and spindle vibrations were measured both in idle and milling conditions on aluminium or steel specimens. A review of the results outlines the possibility of not irrelevant kinematic and structural improvements

### **1. INTRODUZIONE**

Lo studio fatto sulla fresatrice ha carattere diagnostico, dovendo servire come punto di partenza per la riprogettazione della macchina sia dal punto di vista strutturale che degli azionamenti interni.

La fresatrice studiata appartiene ad una classe tipicamente impiegata nella produzione di stampi di piccole dimensioni e di forma molto complessa, settore nel quale la concorrenza si affronta abbreviando il tempo di lavorazione con alte velocità di taglio e con il minimo numero di passate per ottenere la finitura superficiale voluta e senza ricorrere all'intervento manuale.

Dal punto di vista del funzionamento, la macchina in questione dispone di servocontrollo su 5 assi molto raffinato per la velocità e la precisione dei posizionamenti che riesce a garantire mentre la parte meccanica non è in grado di sfruttare tutte le potenzialità offerte dall'elettronica. L'obiettivo finale della ricerca è di dare indicazioni utili per progettare

macchine con prestazioni strutturali e cinematiche tali da far raggiungere precisioni di lavorazione dell'ordine di grandezza del  $\mu\text{m}$  in fase di finitura.

Per individuare i limiti della fresatrice è stato necessario studiare il comportamento dinamico della macchina completa, sia ferma che durante le lavorazioni, con le evidenti complicazioni sperimentali dovute soprattutto a disturbi di fondo, provocati da sorgenti estranee o comunque non di interesse diretto, alle non linearità e all'elevato smorzamento propri di strutture complesse.

Per minimizzare gli effetti di tutti questi fattori è stato necessario analizzare con particolare cura i dati rilevati. E' stato così possibile individuare le cause strutturali e cinematiche che impediscono alla macchina di sfruttare a fondo le prestazioni del sistema di controllo.

## 2. DESCRIZIONE DELLA FRESATRICE

La macchina, a controllo numerico, ha la tavola verticale fissa. Si compone, da un punto di vista strutturale, di un basamento, di un braccio su cui è fissata una testa portautensile ed un montante, che formano una struttura a C, realizzata in ghisa. Nella fig. 1 è riportata la vista globale della fresatrice.

A differenza delle fresatrici classiche, la movimentazione del pezzo viene sostituita dal moto dell'utensile che assieme al braccio si può muovere lungo la direzione parallela a quest'ultimo su guide poste sul montante.

Per quanto riguarda le altre due traslazioni viene sfruttato un carro a croce, posto tra il basamento ed il montante: lungo la direzione orizzontale perpendicolare al braccio si muove il sistema costituito da quest'ultimo, montante e carro a croce, mentre in direzione verticale è mobile il gruppo costituito da braccio e montante.

La macchina è dotata di una tavola portapezzo fissabile al bancale: questa può ruotare attorno sia ad un asse verticale sia ad un asse orizzontale e parallelo all'asse del braccio.

In totale quindi la fresatrice ha cinque assi controllati e ciò permette la lavorazione di pezzi disposti sotto squadra e, comunque, di superfici di forma complicata, una volta che il controllo permetta di eseguire la lavorazione.

Il sistema di riferimento della macchina considera come asse x la direzione orizzontale e perpendicolare al braccio, come asse y la direzione orizzontale e parallela all'asse del braccio, come asse z la direzione verticale ortogonale ad x ed y.

Il braccio (fig. 2) ha una sezione quadrata, con una serie di alettature interne disposte lungo l'asse; sulla parte anteriore viene fissata la testa portautensile.

Il montante (fig. 3) ha una sezione rettangolare variabile lungo il proprio asse, con alettature di rinforzo interne: sulla parte superiore è ricavata la sede per le guide del moto di avanzamento del braccio lungo l'asse y, mentre nella zona frontale è collocata quella per il moto di avanzamento lungo l'asse z.

Il moto di avanzamento lungo le tre direzioni dello spazio è ottenuto attraverso una catena cinematica, la stessa per ogni asse, della quale fanno parte un motore, una cinghia, un sistema con vite a ricircolazione di sfere ed un sistema di guida dell'elemento mobile da movimentare.

La vite a sfere usata è a doppia chiocciola precaricata e viene sostenuta da una coppia di cuscinetti obliqui con elevato precarico.

Il moto alla vite a ricircolazione di sfere è dato da un motore brushless attraverso una trasmissione a cinghia dentata con rapporto di riduzione pari a 2.

A. Bracciali, R. Ciuffi, P. Rissone, M. Toderi

Il moto di traslazione relativo tra le varie parti della macchina è assicurato da guide a rullini, leggermente precaricati per eliminare la possibilità di giochi ed aumentare la rigidità. Il moto di rotazione viene trasmesso al mandrino da un motore elettrico asincrono trifase, posto sulla parte superiore del braccio mediante una cinghia piatta precaricata. La massima velocità di rotazione del mandrino (24000 giri/min.) è ottenuta con la velocità massima del motore di 12000 giri/min con rapporto di moltiplicazione pari a 2.

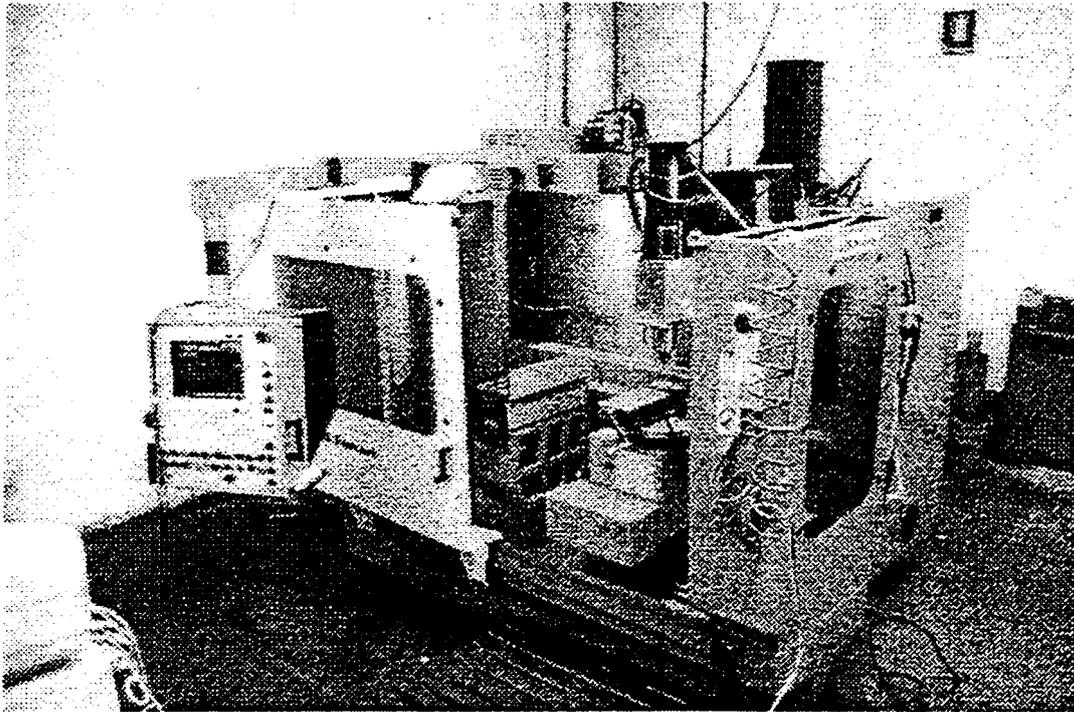


Fig. 1 Vista globale della fresatrice C.B. Ferrari A15

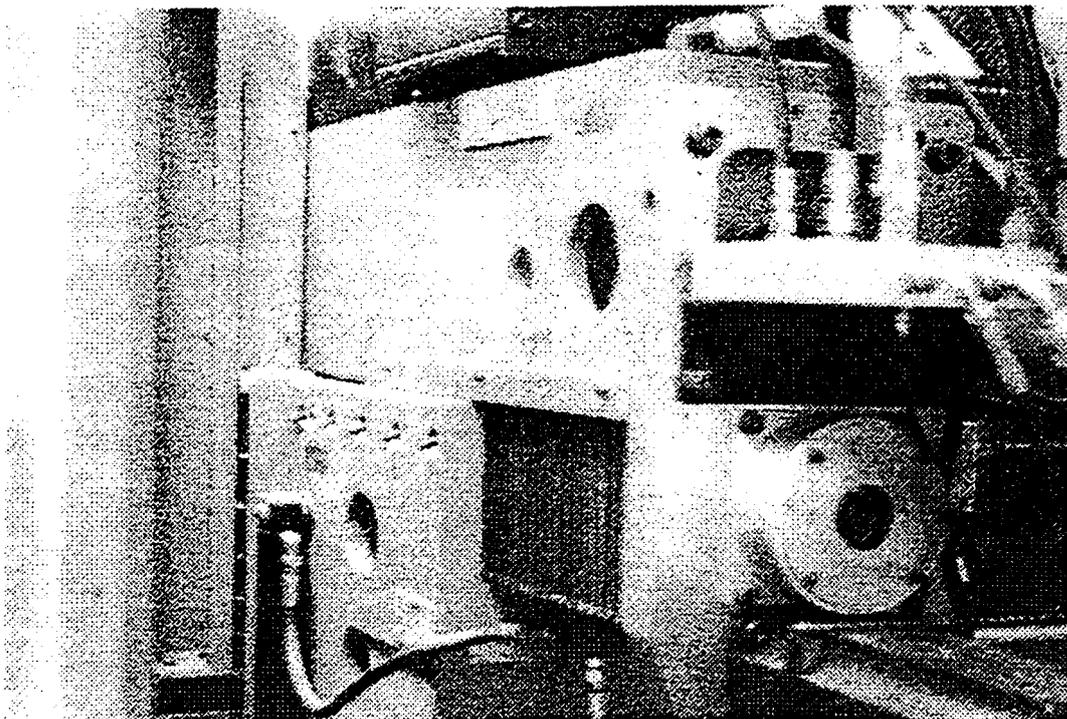


Fig. 2 Vista della parte posteriore del braccio

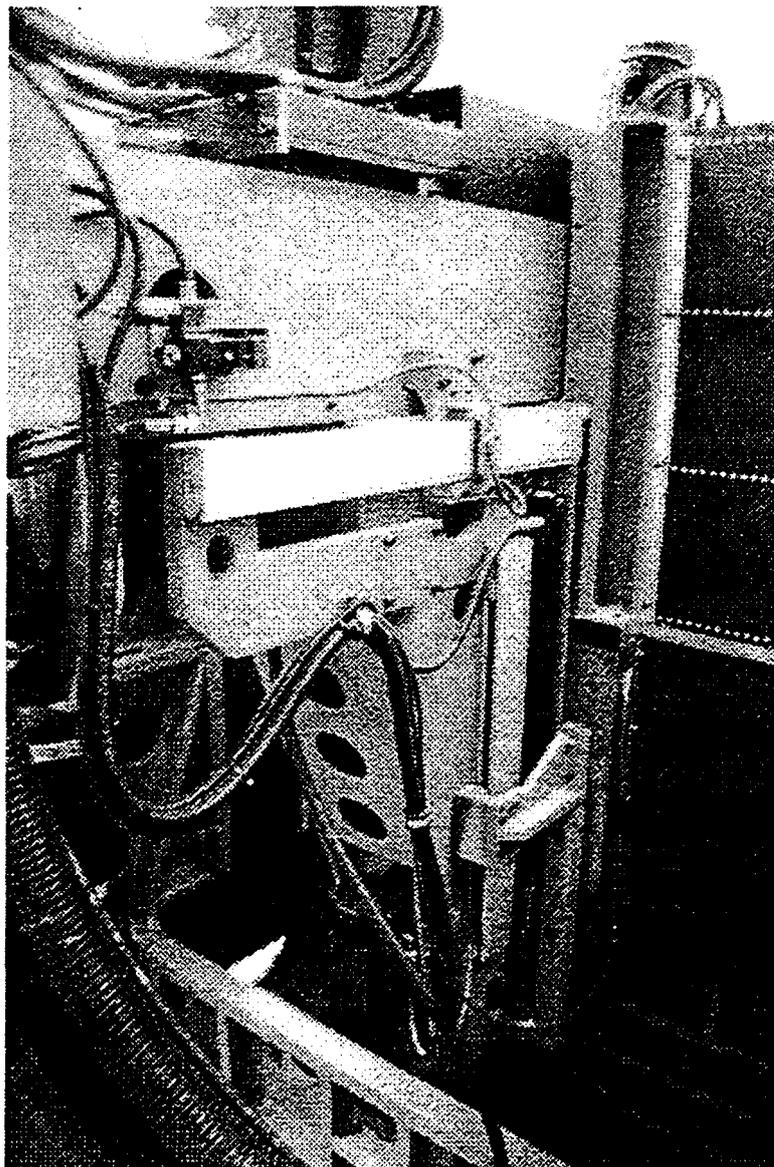


Fig. 3 Vista posteriore di braccio e montante

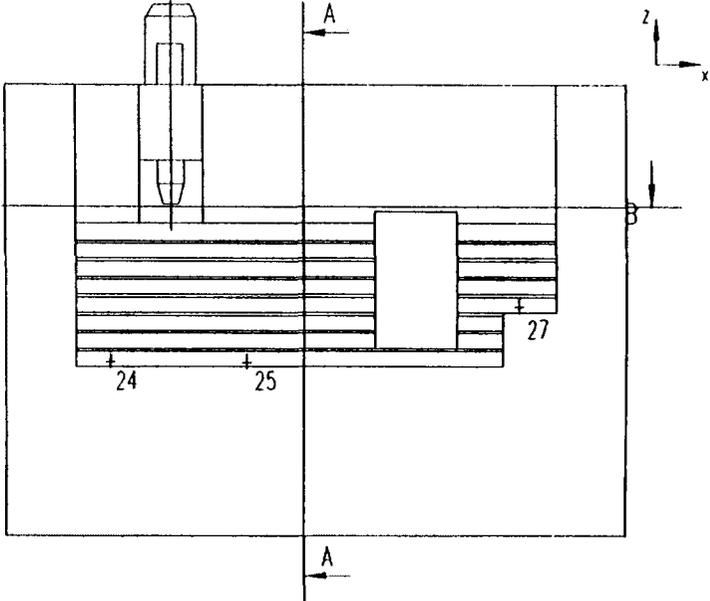
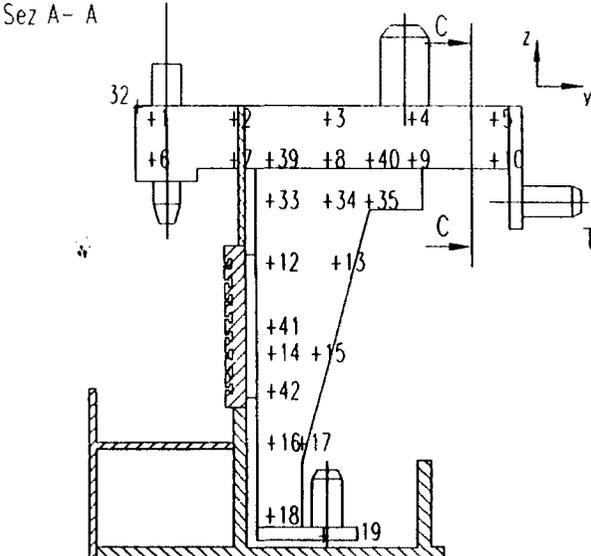
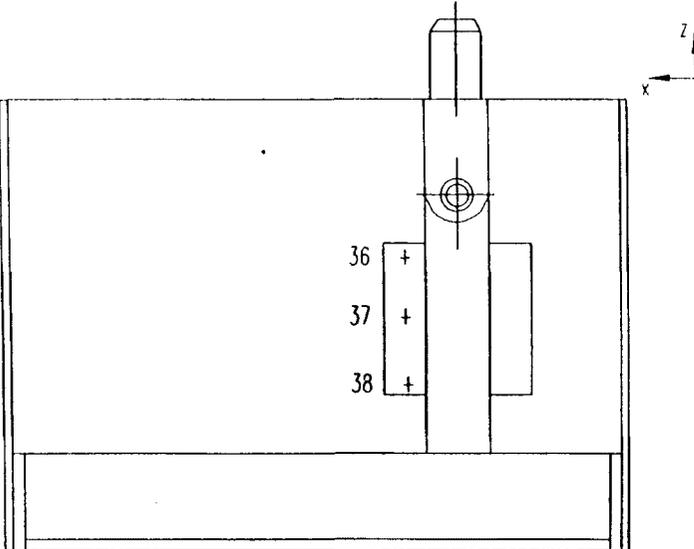
### 3. CARATTERIZZAZIONE DELLA DINAMICA STRUTTURALE

Per individuare possibili comportamenti critici, è stata impiegata la tecnica dell'analisi modale.

Come detto, la fresatrice ha la tavola portapezzo fissa, con braccio e montante mobili: ciò comporta differenze sostanziali nella geometria complessiva a seconda delle posizioni relative tra elementi mobili e fissi. Di conseguenza la macchina ha rigidezze diverse in funzione della sua disposizione generale.

Allo scopo di contenere in tempi accettabili la durata complessiva delle misure, è stato necessario arrivare a un compromesso tra qualità della discretizzazione e quantità delle possibili posizioni di lavoro da esaminare della macchina. Alla fine è stato messo a punto un modello modale composto da oltre 130 gradi di libertà relativo a 3 configurazioni della fresatrice: con assi a inizio corsa, a metà corsa e a fine corsa.

Nella fig. 4 è schematizzata una configurazione con la posizione dei punti di misura.



Sez C - C



Sez B - B

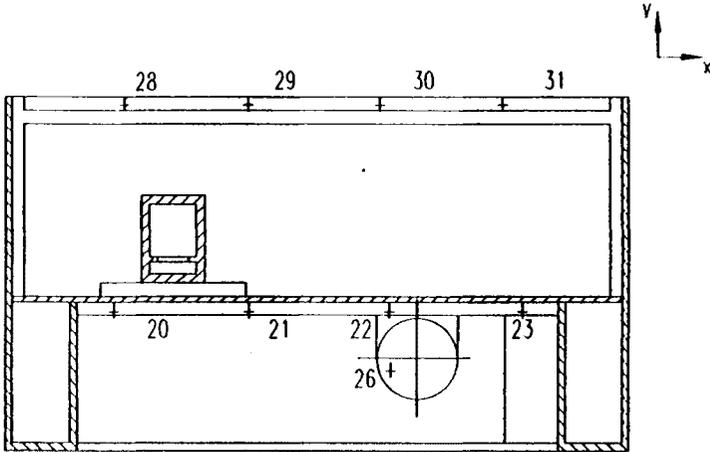


Fig. 4 Collocazione dei punti di misura

Per la misura delle accelerazioni è stato usato un accelerometro triassiale, limitando il campo di analisi a 400 Hz, perchè la rigidità dinamica è stata valutata attraverso gli spostamenti, trascurabili con il crescere della frequenza. L'eccitazione adottata è di tipo impulsivo, imposta con un martello strumentato di massa opportuna e dotato di una superficie di impatto in gomma per aumentare l'energia trasmessa alle basse frequenze. L'andamento nel tempo e lo spettro di potenza della forza impressa sono mostrati nella fig. 5.

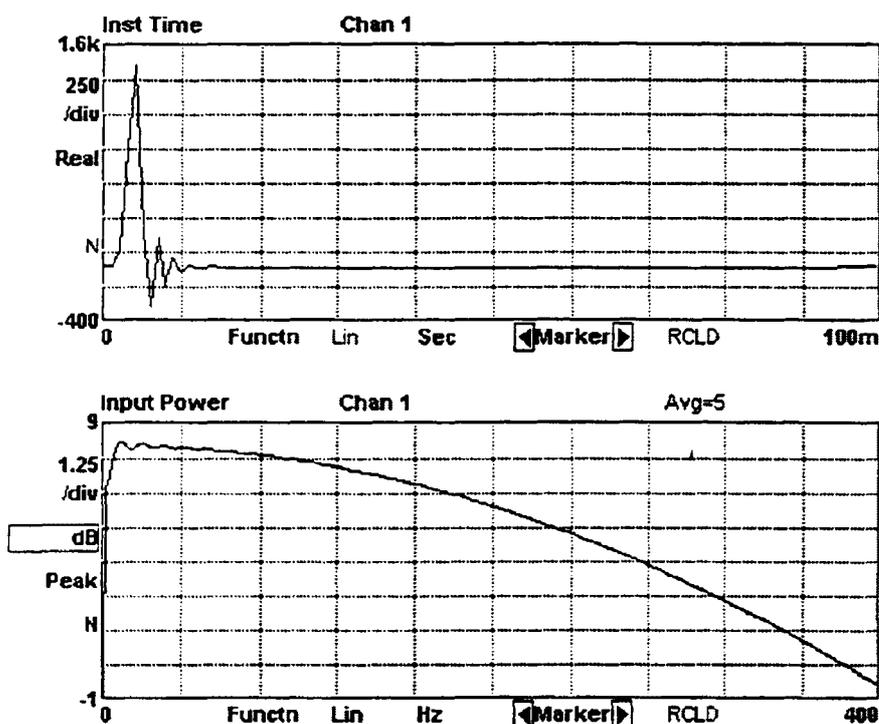


Fig. 5 Andamento temporale e spettro di potenza della forza applicata

Data la complessità della struttura, per estrarre i parametri modali è stato impiegato l'algoritmo ai minimi esponenziali complessi (LSCE) che tiene conto dell'accoppiamento dei modi propri e fornisce la stima media di ogni parametro modale.

La validazione del modello modale così ottenuto è stata fatta sia valutando la matrice del MAC (Modal Assurance Criterion), in cui è calcolato il grado di dipendenza tra modi, sia confrontando le risposte in frequenza sperimentali (ma non usate per l'estrazione dei parametri) con quelle sintetizzate, cioè stimate con i dati modali disponibili.

Per l'analisi dei risultati sono stati considerati solo i modi la cui combinazione influisce di più sul comportamento complessivo della fresatrice, valutando quindi per ciascuno dei modi il valore del fattore di partecipazione modale (MPF).

I risultati principali sono riassunti nelle figg. 6,7 e nella tab. 1.

Risulta evidente che i modi di vibrare di gran lunga più critici in ogni configurazione della macchina sono quelli legati alla torsione del montante; sembrano anche presenti (in modo più evidente nella configurazione più rigida) effetti dovuti alla flessibilità delle guide e degli azionamenti tra braccio e montante.

Dal punto di vista progettuale è interessante notare che la rigidità orizzontale del braccio è abbastanza alta da garantire risonanze al di fuori del campo di interesse: quindi l'eventuale scarsa precisione delle lavorazioni in direzione ortogonale al braccio (asse x

della macchina) è da imputare solo al comportamento torsionale del montante, che sarebbe il primo componente da riprogettare.

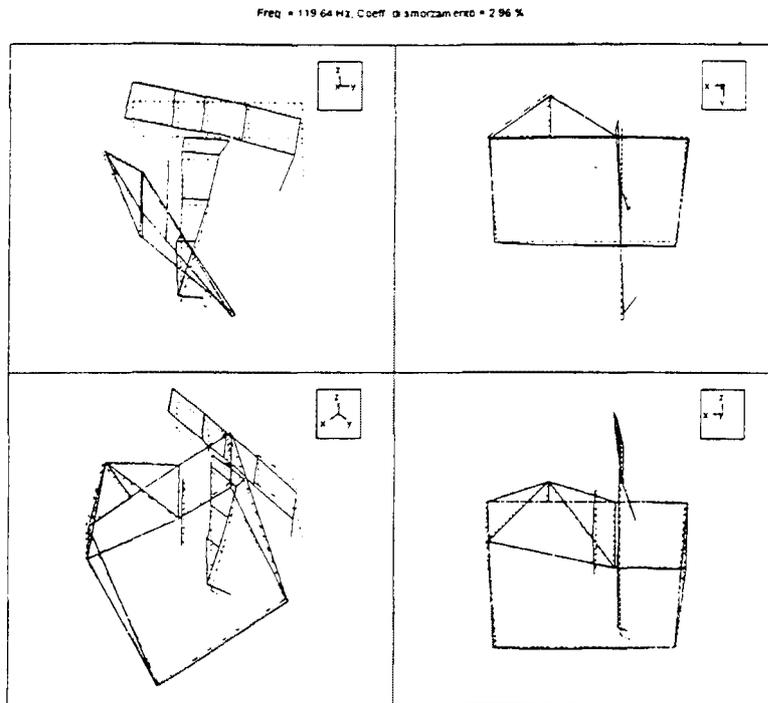


Fig. 6 Assi inizio corsa: modo 5 flessione verticale del braccio

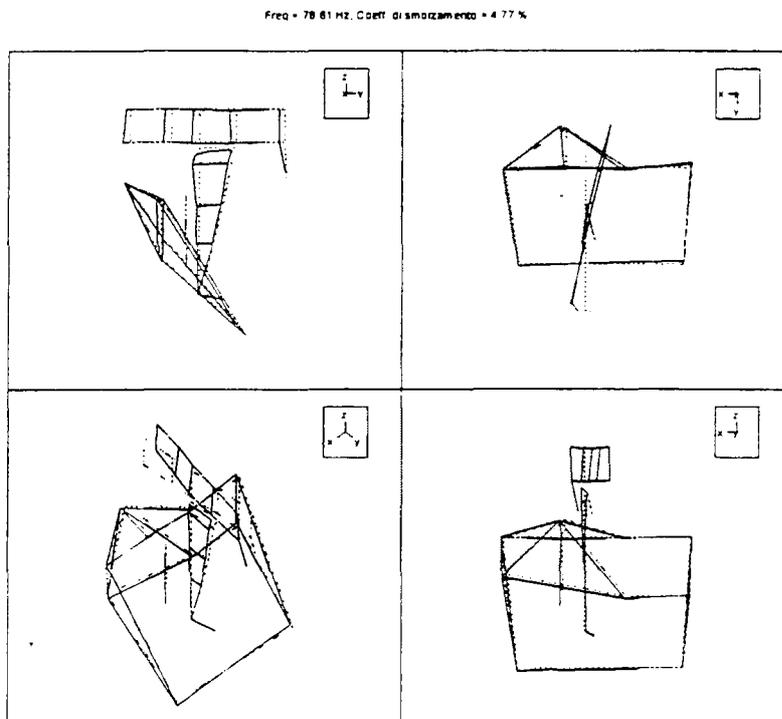


Fig. 7 Assi metà corsa: modo 2 torsione del montante

	N. modo	Freq. (Hz)	$\eta$ (%)	MPF (%)	Caratteristica principale del modo	Note
Fresatrice con assi a inizio corsa	1	72	6.4	12.8	Torsione del montante	
	2	86	5.8	12.3	Torsione del montante	Moto relativo traslatorio tra braccio e montante: dovuto alla flessibilità della vite a sfere
	5	119	2.4	14.1	Flessione verticale del braccio	Il moto ha componenti rigide, dovute alla flessibilità delle guide (v. fig. 3.3)
	25	365	2.8	10.9	Flessione verticale. e orizzontale. del braccio	Moti puramente elastici
Fresatrice con assi a metà corsa	1	69	6.3	11.4	Torsione del montante	
	2	79	4.8	10.5	Torsione del montante	v. fig. 3.4
	6	118	3.2	21.2	Flessione verticale del braccio	Il moto sembra avere modeste componenti rigide, dovute probab. alla flessibilità delle guide
	7	120	2.7	12.3	Flessione verticale del braccio	Moto piano, puramente elastico (v. fig. 3.5)
Fresatrice con assi a fine corsa	1	69	6.3	11.4	Torsione del montante	
	2	79	4.8	10.5	Torsione del montante	
	6	118	3.2	21.2	Flessione verticale del braccio	Moto elastico
	7	120	2.7	12.3	Flessione verticale del braccio	Moto elastico

Tab.1 Classificazione delle forme modali ( $\eta$  smorzamento modale)

#### 4. EFFETTI DELLA LAVORAZIONE

In questa serie di prove sono state misurate le vibrazioni indotte dal funzionamento della fresatrice nei punti più importanti per la valutazione della precisione di lavorazione e cioè sul mandrino e sulla tavola portapezzo. Anche in questo caso si sono impiegati accelerometri triassiali. Dovendo acquisire 6 canali di dati contemporanei, è stata impiegata una scheda National Instruments con convertitore A/D a 12 bit con frequenza di campionamento di 500 kHz. Per evitare problemi di aliasing, ciascun canale è stato campionato ad una frequenza doppia rispetto alla massima che il sistema di fissaggio (che agisce così da filtro meccanico) dell'accelerometro consentiva di misurare. I segnali di accelerazione sono stati filtrati digitalmente e integrati in modo da calcolare gli spostamenti assoluti.

Sono state fatte due serie di prove: nella prima, con gli assi della fresa a metà corsa, si sono misurati gli effetti della rotazione del solo mandrino; nella seconda sono state eseguite lavorazioni di spianatura su prismi in lega di alluminio e in acciaio da stampi, con parametri di taglio corrispondenti alla sgrossatura, semifinitura e finitura per valutare gli effetti dinamici degli sforzi di taglio. Nella tab. 2 sono riportati i parametri di lavoro.

Lavorazione	Prof. Passata (mm)	Larg. Passata (mm)	Avanzam. (mm/min)	V. Taglio (giri/min)	Utensile
<b>Acciaio X40Cr13</b>					
Sgrossatura	2	18	480	1600	Fresa piana a 2 taglienti, $\Phi$ .20 mm
Semifinitura	1	2	800	2500	Fresa sferica a 2 taglienti, $\Phi$ . 12 mm
Finitura	0.3	0.05	1000	10000	Fresa sferica a 1 tagliente $\Phi$ 6 mm
<b>Alluminio Ergal</b>					
Sgrossatura	10	18	630	2800	Fresa piana a 4 taglienti, $\Phi$ . 20 mm
Finitura	0.5	8	500	5600	Fresa piana a 3 taglienti $\Phi$ 10 mm

Tab. 2 Parametri di taglio delle lavorazioni di prova

Con le stesse velocità di rotazione sono state eseguite anche le prove a vuoto.

#### 4.1 Prove a vuoto

I segnali vibratori hanno carattere prevalentemente random, come si vede nella fig. 8

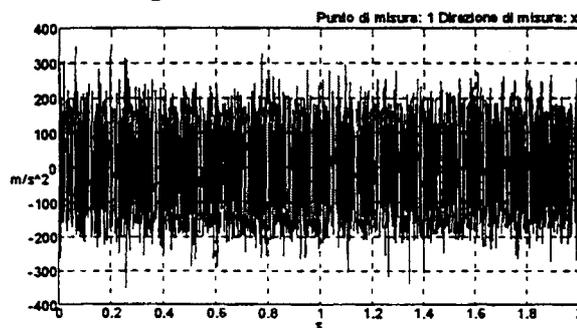


Fig. 8 Storia temporale dell'accelerazione sul mandrino a 10000 giri/min.

Dall'analisi in frequenza dei segnali, omessa per brevità, si è visto che le armoniche connesse alla velocità di rotazione sono importanti solo a partire da 10000 giri/min. Inoltre si notano armoniche legate alla presenza dei cuscinetti e della cinghia di trasmissione.

Nella tab. 3 sono riportati in funzione della velocità i valori rms degli spostamenti del mandrino e della tavola, importanti perchè definiscono il limite di precisione ottenibile dalla macchina.

E' interessante notare che la rotazione del mandrino eccita la struttura con la stessa energia sia in direzione x che in y: d'altra parte la maggiore flessibilità riscontrata nelle prove di analisi modale in direzione x, dovuta alla torsione del montante, giustifica i valori più grandi degli spostamenti in tale direzione.

Ancora da notare è il brusco aumento degli spostamenti a partire da 5600 giri/min (93 Hz),

regime al quale corrisponde un'elevata deformazione verticale (z) e trasversale (y), superiore anche a quella riscontrata a regimi più alti. Come mostrato nella tab. 3 attorno a tale frequenza sono presenti modi torsionali (79 Hz) e flessionali verticali (118 Hz) che sono evidentemente eccitati dalla forzante. In ogni caso, gli spostamenti riscontrati sono ovviamente molto più piccoli di quelli in lavorazione.

Giri/min		1600	2500	2800	5600	10000	15000
mandrino	x	1.5	3.4	4.3	49.4	42.2	174.2
	y	0.9	1.8	2.1	52.4	13.6	30.9
	z	1.1	2.3	2.8	94.4	19.6	27.8
tavola	x	0.6	0.5	0.8	4.2	3.5	10.7
	y	0.6	0.5	0.6	3.7	3.3	7.7
	z	0.4	.04	0.4	2.6	2.8	8.2

Tab. 3 Spostamenti rms a vuoto ( $\mu\text{m}$ ) in funzione del numero di giri del mandrino

#### 4.2 Prove con asportazione di truciolo

Le fresature sono state eseguite lungo x e sono stati analizzati i segnali relativi a lavorazioni in fase e in controfase: in nessun caso, sotto questo aspetto, si sono evidenziate differenze significative. I segnali si presentano come transitori all'inizio (imbocco fresa) e alla fine (uscita fresa) come mostrato in fig. 9.

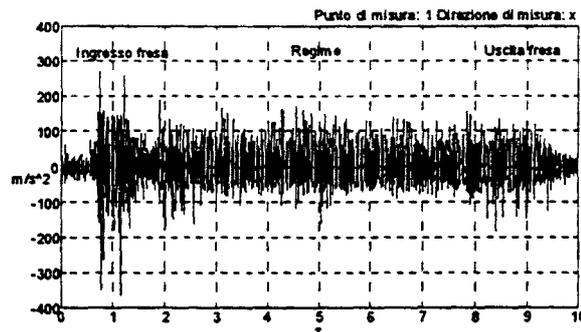


Fig. 9 Accelerazioni durante una passata di sgrossatura su acciaio

Lo studio è stato ovviamente limitato alla zona centrale stazionaria. Questa volta lo spettro del segnale è di tipo prevalentemente deterministico, essendo legato alla periodicità delle forze di taglio con relative armoniche.

Nella fig. 10 è mostrato lo spettro di accelerazione del mandrino durante la sgrossatura su acciaio. Si notano picchi alle frequenze di 55.63 e 111.26 Hz. determinate dalla velocità di rotazione del mandrino e dal numero (2) dei taglienti della fresa.

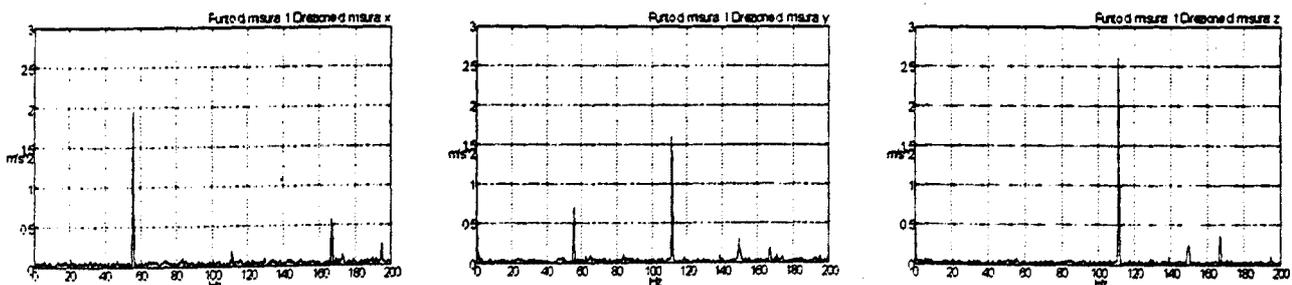


Fig. 10 Spettri delle accelerazioni misurate sul mandrino in x,y,z durante la sgrossatura su acciaio

I valori assunti nelle 3 direzioni alle due frequenze sono ancora giustificati dal comportamento modale della struttura.

Nella Tab. 4 sono riassunti gli spostamenti in (rms) elaborati per le varie condizioni.

		Sgrossatura acciaio 1600	Semifinitura acciaio 2500	Sgrossatura alluminio 2800	Finitura alluminio 5600	Finitura acciaio 10000
<b>Mandrino</b>	x	12.7	4.9	6.1	47.6	57.8
	y	4.7	3.6	5.1	50.2	37.6
	z	4.0	4.3	8.9	101.6	18.9
<b>Tavola</b>	x	3.2	3.6	3.0	2.9	2.2
	y	3.9	3.6	2.8	2.2	3.2
	z	3.9	4.5	3.0	2.4	3.0

Tab. 4 Spostamenti rms in lavorazione ( $\mu\text{m}$ ) in funzione della velocità del mandrino (giri/min)

Dal confronto con i dati misurati a vuoto (tab. 3) si nota che le forze di taglio influenzano poco gli spostamenti relativi tra mandrino e tavola portapezzo e che i regimi critici di funzionamento sono proprio quelli tipici delle lavorazioni di finitura, in cui è massima la necessità di precisione. Le cause sono da ricercarsi in primo luogo nelle scarse prestazioni dinamiche del montante, come già accennato, e poi nella catena cinematica di azionamento del mandrino ed in particolare nella cinghia di trasmissione, le cui componenti in frequenza sono state individuate negli spettri di vibrazione.

## 5. CONCLUSIONI

Le caratterizzazioni modale ed in lavorazione della fresatrice in esame hanno mostrato risultati interessanti e soprattutto concordanti.

Dalle analisi modali è stato mostrato che il mandrino, componente critico della macchina, subisce i più grandi spostamenti dinamici in direzione ortogonale al braccio, su un piano orizzontale, soprattutto per la flessibilità torsionale del montante, e non a causa di scarsa rigidità flessionale del braccio.

Le prove con fresatrice in funzione hanno confermato che sul mandrino, nella stessa direzione, siano quasi sempre presenti le vibrazioni di maggiore entità, sia in lavorazione, sia in prove a vuoto.

I due approcci sperimentali evidenziano come una caratterizzazione modale della macchina ed una indagine legata al comportamento in lavorazione siano complementari, convergendo su alcuni aspetti importanti e contemporaneamente fornendo indicazioni specifiche. Infatti le prove con fresatrice in lavorazione hanno mostrato che la cinematica di azionamento del mandrino, ed in particolare la trasmissione a cinghia, limiti la precisione di lavoro ottenibile.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] L.Baoyang, C.Xueming, Z.Chengui 1991 Proceedings of the 9th International Modal Analysis Conference Part 2 (of 2) Publ by Union Coll, Graduate & Continuing Studies, Schenectady, NY, USA, p 1596-1600 Identification of The Machine Tool Receptance by means of Experimental Modal Analysis.
- [2] J.G.Cherng, Y.Zhang 1994 Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference Part 2 (of 2) Publ by Union Coll, Graduate & Continuing Studies, Schenectady, NY, USA, p 1626-1632 Modal Analysis of a High Speed Spindle.
- [3] J.J.Fung, Y.G.Tsuei 1994 Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference Part 1 (of 2) Publ by Union Coll, Graduate & Continuing Studies, Schenectady, NY, USA, p 166-170. Modal analysis of Machining Center Structure.
- [4] S.Haranath, N.Ganasan, B.V.A.Rao 1987 International Journal of Machine Tools & Manufacture Vol. 27 n 1, p 27-41. Dynamic analysis of machine tool column with damping layer-finite element approach.
- [5] T.Kobayashi, M.Burdekin 1995 Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture Vol. 208 n B4, p 245-251. The effects of the damping characteristics of the slideways on the dynamic characteristics of workpiece fixtures mounted on machine tool tables.
- [6] Z.H.Lin, D.C.Hodgson 1988 International Journal of Machine Tools & Manufacture Vol.28 n 2, p 93-101. In process measurement and assessment of dynamic characteristics of machine tool structures.
- [7] Y.C.Shin, K.F.Eman, S.M.Wu 1989 Journal of Engineering for Industry, Transaction ASME Vol. 111 n 2 May, p 116-124. Experimental Complex Modal Analysis of Machine Tool Structures.