

**SULLA RILEVAZIONE DI DISCONTINUITA' IN ELEMENTI
STRUTTURALI TRIDIMENSIONALI PER FINI DIAGNOSTICI**

F. ANGRILLI, G. BERTI, G. FANTI, D.P. TEMPIA

estratto da L'AEROTECNICA - MISSILI E SPAZIO
Volume 66, numero 1, marzo 1987

SULLA RILEVAZIONE DI DISCONTINUITA' IN ELEMENTI STRUTTURALI TRIDIMENSIONALI PER FINI DIAGNOSTOCI

F. ANGRILLI, G. BERTI, G. FANTI, D.P. TEMPIA
Istituto di Meccanica Applicata - Facoltà di Ingegneria - Università di Padova

SOMMARIO

Scopo del presente lavoro è la valutazione dell'efficacia di un metodo per l'individuazione di discontinuità in elementi strutturali basato sul rilevamento di perturbazioni nella propagazione di onde elastiche. Lo studio, ancora preliminare, affronta il caso particolarmente semplice di una barra di acciaio con sezione rettangolare nella quale è presente un intaglio trasversale. Si è analizzato il segnale ottenuto applicando un'eccitazione impulsiva ad una barra, tramite un breve urto ad un'estremità, e rilevando lo spostamento istantaneo dell'estremità opposta mediante un sensore capacitivo. Il sistema fisico è stato poi rappresentato con un modello ad elementi finiti ed è stata eseguita l'integrazione diretta delle equazioni del moto; lo spettro della risposta è stato ottenuto con tecniche ARMA. Il confronto tra le risposte sperimentali e quelle calcolate ha mostrato innanzitutto un'ottima correlazione ed inoltre che è possibile diagnosticare con sicurezza la presenza di discontinuità che interessano almeno il 30% della sezione. L'analisi ad elementi finiti nel dominio del tempo permette di rilevare la presenza dell'intaglio con sensibilità dello stesso ordine, mentre segnali attribuiti a posteriori a riflessioni delle onde elastiche sono riscontrabili già con intagli che interessano il 17% della sezione.

1. INTRODUZIONE

Un membro meccanico sottoposto a carico variabile nel tempo può criccarsi a fratturarsi dopo un certo numero di cicli. Progettare opportunamente il pezzo, prevedendo la durata a fatica è importante, ma in genere non è sufficiente ad evitare rotture impreviste, perché la durata a fatica non è un dato certo, ma un valore statistico che dipende da molti fattori. In alcuni casi, quando la rottura del pezzo comporta conseguenze catastrofiche, o quando il costo del controllo è inferiore al costo conseguente ad un'improvvisa rottura, risulta necessario eseguire un controllo periodico di tipo non distruttivo per l'individuazione di eventuali cricche e per seguire nel tempo la loro propagazione. I metodi classici di ispezione non distruttiva [1] sono generalmente applicabili; l'ispezione visuale è ancora il metodo più comune e più facilmente realizzabile; è pure possibile utilizzare mezzi automatici, ma la loro applicazione è tuttora in fase di sviluppo e di perfezionamento. Questi metodi permettono di rivelare solo i difetti che sono evidenti sulla superficie e solo dopo che si è effettuata un'adeguata pulizia dalle incrostazioni. Si possono inoltre utilizzare liquidi penetranti oppure altri metodi quali quello magnetico e

quello ad ultrasuoni. La radiografia è utilizzata per l'esame di saldature, ed è preferita quella neutronica ai raggi X e quella ai raggi gamma. Vi sono poi metodi quali l'ispezione con emissione acustica e l'analisi delle vibrazioni che permettono di stabilire se la struttura nel suo complesso è sicura o meno, e che non presentano la complicazione di dovervi accedere direttamente o ripulire la stessa prima dell'ispezione. L'emissione acustica si fonda sul fatto che una cricca, quando è sottoposta ad un carico, si propaga in modo discontinuo rilasciando energia acustica e termica al momento della crescita; vengono poste delle sonde accelerometriche in certi punti della struttura in prossimità dei punti a più alto rischio e con una tecnica di triangolazione si individua l'origine dell'emissione. L'analisi delle vibrazioni nel campo delle basse frequenze (0.1 - 100 Hz), o analisi modale, consiste nella ripetuta misura delle frequenze proprie di vibrazione della struttura. Permette di individuare cricche in zone non esplorate, ma il suo limite è nella possibilità di diagnosticare solo danni già importanti.

A questi metodi se ne stanno ora affiancando altri basati sull'influenza di cricche sia sullo smorzamento

modale che sulla propagazione di onde elastiche nel campo delle frequenze intermedie (1 - 100 kHz). Il presente lavoro mira ad analizzare una metodica diagnostica basata sulla propagazione di onde elastiche nel campo delle frequenze intermedie (1 - 15 kHz) [2], [3].

2. PRESENTAZIONE DELLA PROCEDURA SPERIMENTALE

Gli elementi strutturali per la sperimentazione consistono di quattro barre di acciaio di sezione rettangolare (0.02 x 0.03 m) e di lunghezza di 1 m; su tre di esse, alla distanza di 0.6 m da un'estremità, si sono praticati altrettanti tagli parziali di profondità pari a 5 mm, 10 mm, 15 mm, per simulare discontinuità di entità diverse.

Le barre sono state sospese ad un telaio di sostegno, vedi Fig. 1, con due elastici molto flessibili in modo da simulare il caso teorico di una barra libera ad entrambe le estremità. La forma e la profondità del taglio sono state scelte per poter confrontare poi i risultati sperimentali con i valori ottenuti mediante calcoli con un metodo ad E. F.

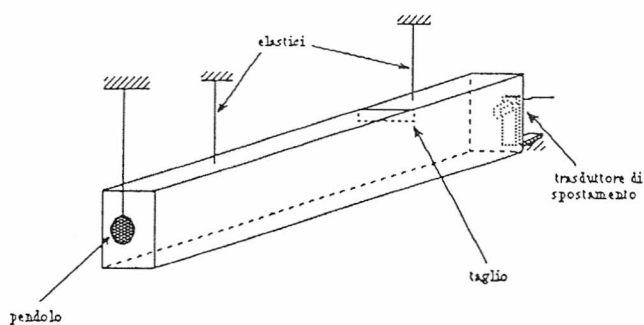


Fig. 1 - Barra utilizzata nelle prove.

Per generare un impulso più ripetibile possibile, sia per ampiezza che per punto di applicazione, si è costruito un pendolo ed è stata eseguita la media lineare degli spettri delle risposte temporali di 32 impulsi per ridurre gli effetti del rumore di fondo.

L'apparato sperimentale, illustrato nelle Figg. 2 e 3, è costituito da:

- trasduttore di spostamento capacitivo;
- preamplificatore;
- filtro passa-alto
- analizzatore di spettro;
- registratore XY;
- pendolo per generare l'impulso.

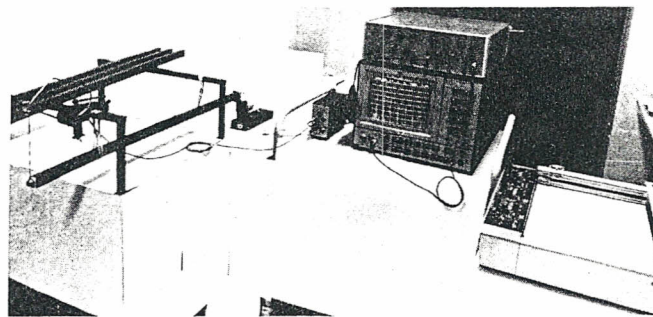


Fig. 2 - Apparato sperimentale, assieme

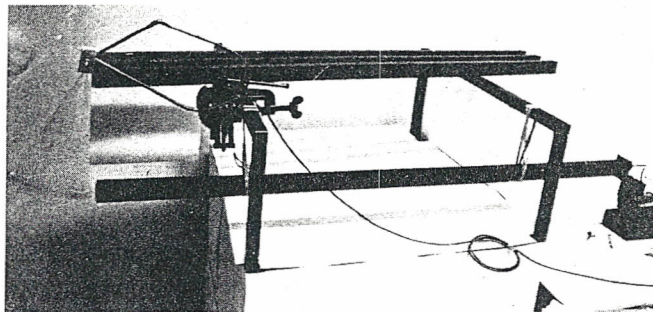


Fig. 3 - Apparato sperimentale, particolare del sistema di supporto della barra.

I moti oscillatori della barra sono risultati a frequenza inferiore a 40 Hz, mentre la prima frequenza propria longitudinale della barra è maggiore di 2500 Hz; la frequenza di taglio inferiore del filtro è stata perciò scelta a 500 Hz.

3. CALCOLO DI VERIFICA AD ELEMENTI FINITI

La teoria dell'elasticità monodimensionale applicata alla barra permette di calcolare facilmente le frequenze naturali, ma fornisce risultati accettabili solo per i primi modi di vibrare e per geometrie particolarmente semplici. Le teorie tridimensionale e bidimensionale possono fornire risultati esatti ma solo per elementi e per strutture di forma particolarmente semplice [4], [5], [6]. La schematizzazione ad elementi finiti consente di affrontare geometrie alquanto complesse e fornisce valori delle frequenze prossimi a quelli previsti dalla teoria tridimensionale [7] e confermati da prove sperimentali [3], [8].

Il codice di calcolo utilizzato è il SAP5, che esegue analisi statiche e dinamiche in campo lineare.

La mesh, vedi Fig. 4, costruita per rappresentare gli elementi strutturali in esame, consiste di:

- 400 elementi di tipo "BRICK" ad 8 nodi;
- 780 punti nodali;
- 2340 gradi di libertà.

L'analisi dinamica consiste nell'applicazione di una forza impulsiva, con andamento triangolare della durata di $20 \mu\text{s}$, nel nodo centrale della sezione di un'estremità e nell'effettuazione di un'integrazione passo a passo, con un intervallo di tempo di $5 \mu\text{s}$, prendendo in considerazione lo spostamento del nodo centrale della sezione all'estremità opposta.

Si è calcolato lo spettro in frequenza utilizzando un programma di elaborazione del segnale FFT. Per migliorare la soluzione si sono utilizzate tecniche ARMA [9]; tale metodo consente di spingere notevolmente la risoluzione in frequenza; il limite è dato dal modello ad E.F. e dal passo di integrazione che consentono di riprodurre i fenomeni con sufficiente fedeltà solo fino a frequenze di 15 kHz. Per migliorare il modello sarebbe necessario diminuire le dimensioni degli elementi finiti aumentando di conseguenza il numero di gradi di libertà ed adottare un intervallo di tempo di integrazione più piccolo; insorgerebbero in tal modo però problemi per limiti della memoria disponibile e per eccessiva durata del tempo di elaborazione.

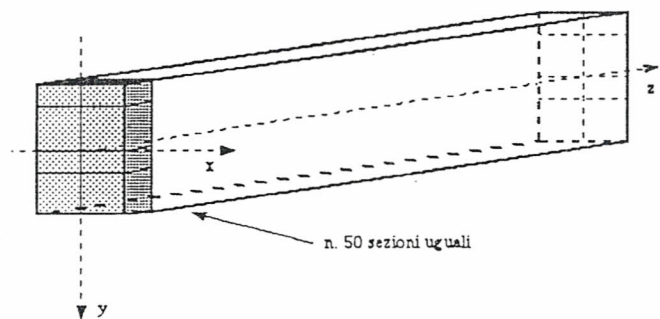


Fig. 4 - Mesh ad elementi finiti.

4. RISULTATI E CONFRONTI

Nell'ambito della precisione ottenuta dal modello ad E.F., e dai risultati sperimentali, possiamo osservare la buona corrispondenza tra le prove di laboratorio ed i corrispondenti risultati numerici della Fig. 5. Tale figura riporta gli andamenti della risposta temporale per i casi di barra senza discontinuità (a) e di barra con discontinuità profonda 15 mm (b); in particolare la frequenza risulta sempre riprodotta con notevole precisione, vedi tabella 1, e nel caso di barra con discontinuità si evidenziano analoghe riflessioni d'onda e presenza di battimenti.

La Fig. 6 riporta gli spettri di potenza sperimentali e numerici relativi ai casi di barra senza discontinuità (a) e di barra con discontinuità di 5 mm (b), 10 mm (c) e 15 mm (d).

Si può notare che il modello ad E.F. riproduce con ottima approssimazione aspetti causati dalla presenza della discontinuità quali il calo in frequenza dei picchi fondamentali e la comparsa di nuovi picchi.

La Fig. 7 riassume l'influenza della profondità della discontinuità sul rapporto tra le frequenze delle barre con taglio e senza taglio per le prime tre frequenze proprie longitudinali sperimentali.

Non è riportata la corrispondente figura relativa ai risultati numerici perché analoga; è da notare invece che, sia i risultati sperimentali, che quelli derivanti dal calcolo ad E.F., evidenziano la diminuzione in frequenza, all'aumentare della profondità del taglio, per tutti i modi di vibrare, tranne il quinto.

Questo fatto può essere spiegato osservando le Figg.

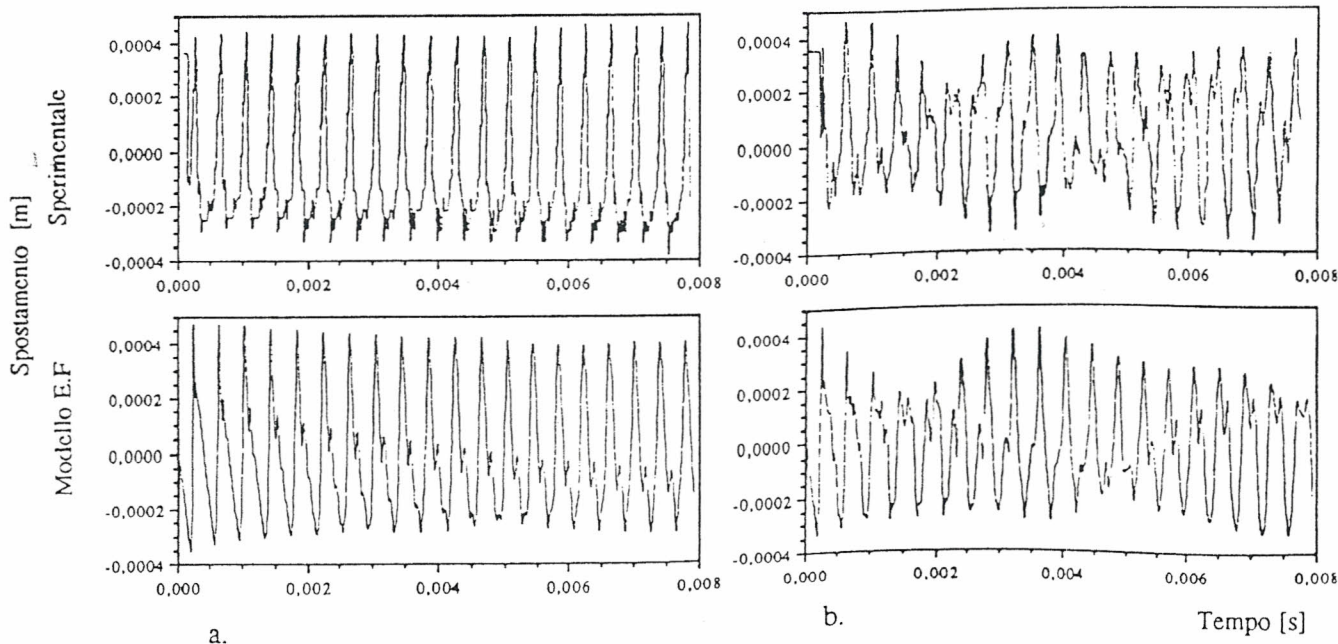


FIG. 5 - Confronto delle risposte temporali sperimentali e numeriche per: a) - barra senza discontinuità; b) - barra con discontinuità di 15 mm.

Tab. 1 - Confronto fra i valori delle prime 5 frequenze ottenute sperimentalmente e mediante calcolo ad E.F.

Frequenza	Senza taglio		Taglio 5 mm		Taglio 10 mm		Taglio 15 mm	
	Sperim.	E.F	Sperim.	E.F	Sperim.	E.F	Sperim.	E.F
1° frequenza.	1° picco	2600	2550	2550	2500	2500	2400	2450
	2° picco				2750	2750	2700	2700
2° frequenza.	1° picco	5150	5150	5150	5150	5150	5050	5050
	2° picco				5500	5500	5450	5450
3° frequenza.	1° picco	7750	7700	7750	7650	7600	7450	7450
	2° picco				7850		7800	7800
4° frequenza.	1° picco	10350	10200	10350	10100	10100	9900	9900
	2° picco				10400		10400	10250
5° frequenza.	1° picco	12300	12500	12300	12300	12500	12300	12500
	2° picco							

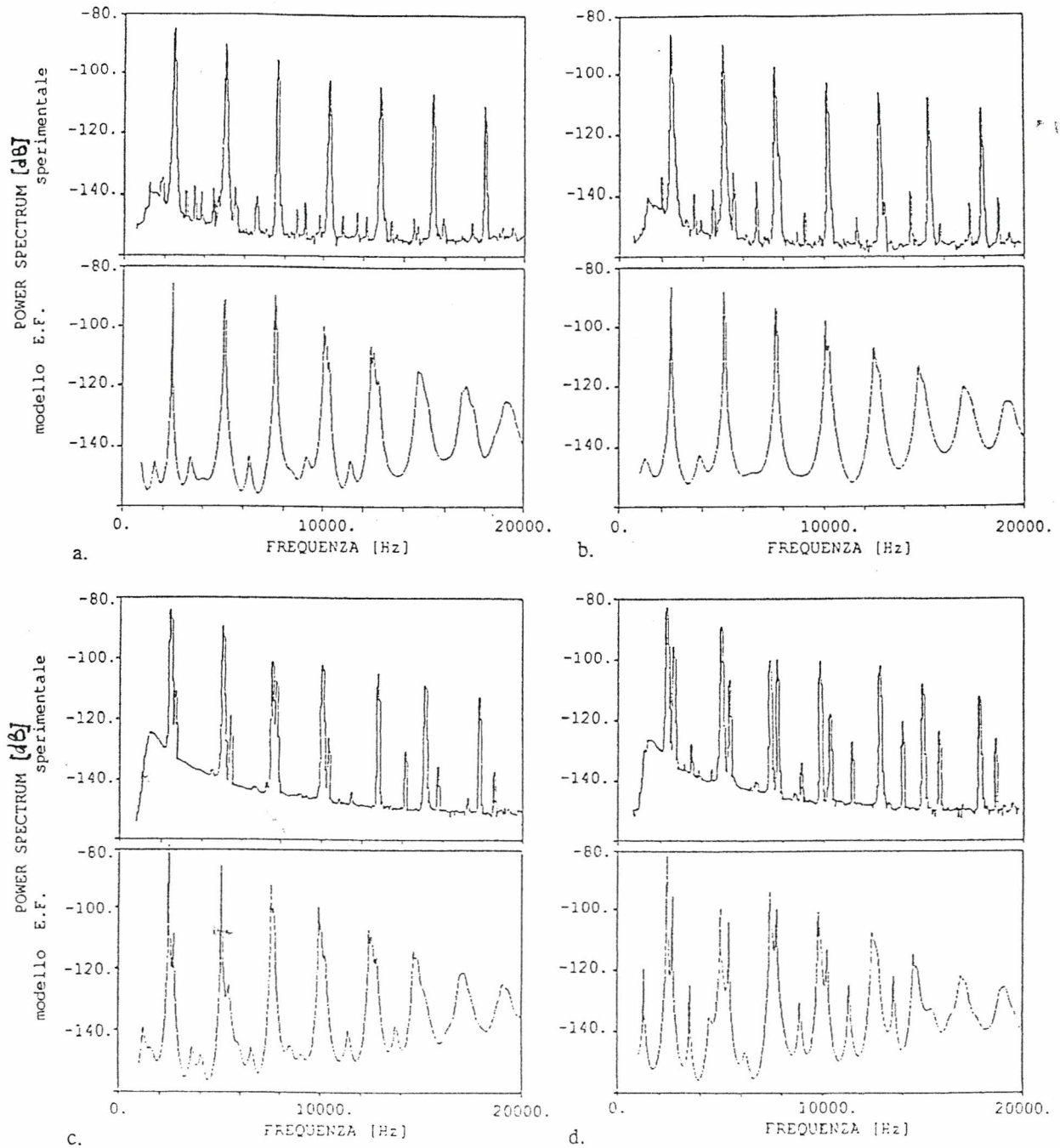


Fig. 6 - Spettri di potenza sperimentali e calcolati per: a) - Barra senza discontinuità; b) Barra con discontinuità di 5 mm; c) - Barra con discontinuità di 10 mm; d) - Barra con discontinuità di 15 mm

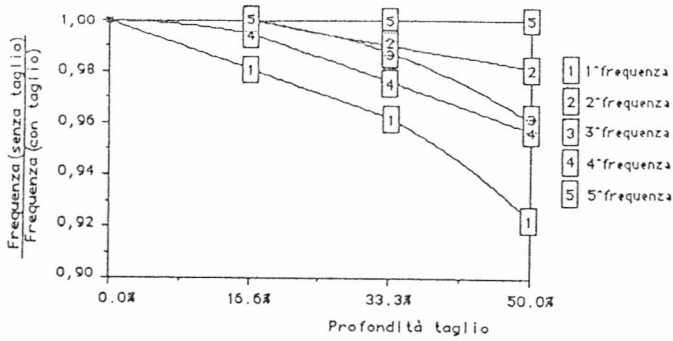
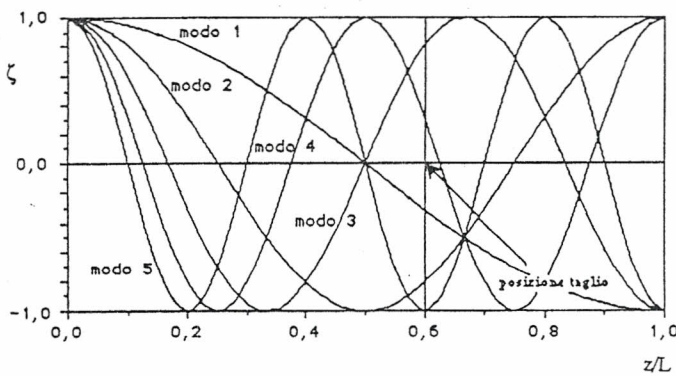


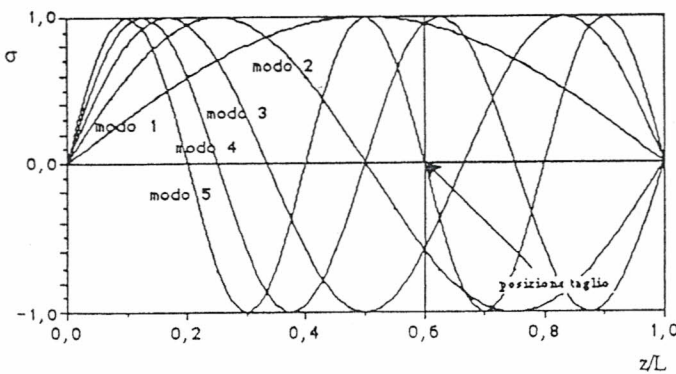
Fig. 7 - Influenza della profondità del taglio sulle frequenze proprie longitudinali

8a ed 8b che rappresentano, in diagrammi adimensionali, rispettivamente lo spostamento e la tensione relativamente alle prime 5 forme modali di vibrazione longitudinale (secondo la teoria monodimensionale). Si può notare che la posizione della discontinuità (a 3/5 dall'estremità della barra) coincide con ventre del quinto modo di vibrare e quindi con un nodo di tensione, il che comporta che eventuali discontinuità in tale posizione, non influenzando lo stato tensionale, non comportano variazioni del modo di vibrare.

La Fig. 9 riporta invece il rapporto delle ampiezze dello spettro di potenza riferito alla profondità del taglio per le prime cinque frequenze proprie longitudinali.



(a)



(b)

Fig. 8 - Diagrammi adimensionizzati delle forme modali ζ (a) e delle corrispondenti tensioni σ (b)

Si possono pertanto evidenziare i due aspetti diagnostici che permettono di individuare la presenza di una discontinuità tipici dell'analisi modale:

- la diminuzione dei valori delle frequenze proprie longitudinali, tanto più evidente al crescere della profondità della discontinuità;
- l'influenza dell'entità della discontinuità sull'ampiezza delle frequenze proprie longitudinali, di cui è difficile attualmente esprimere valutazioni.

Un aspetto diagnostico, più significativo, sembra essere la comparsa di nuovi picchi accanto a quelli corrispondenti alle frequenze principali nei casi di discontinuità di 10 mm e 15 mm vedi Fig. 6, c. e d.

Nella Fig. 10 è riportato lo spettro di potenza della risposta a sollecitazione impulsiva ottenuta con il modello ad E.F. della barra con taglio profondo 15 mm, nel quale però sono stati impediti tutti i possibili modi flessionali vincolando i punti dell'asse della barra: alcuni dei picchi, che erano presenti quando i modi flessionali non erano stati impediti in essa, non compaiono. Questo risultato può spiegare che tali picchi sono dovuti ai modi flessionali che si instaurano grazie alla dissimetria causata dalla presenza della discontinuità.

L'analisi numerica del dominio del tempo, vedi Fig. 5, permette già di effettuare una diagnosi dello stato della barra; una maggiore risoluzione della risposta tempo-

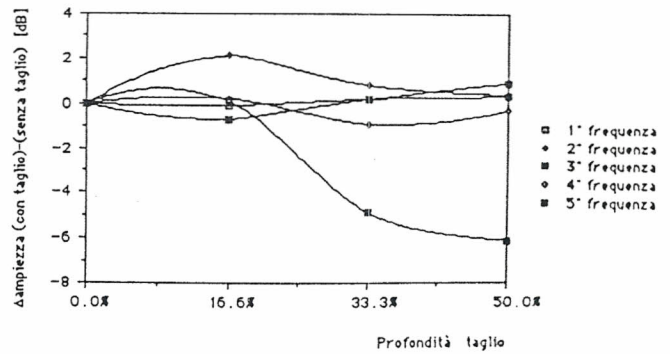


Fig. 9 - Influenza della profondità del taglio sul rapporto delle ampiezze dello spettro di potenza delle frequenze proprie longitudinali

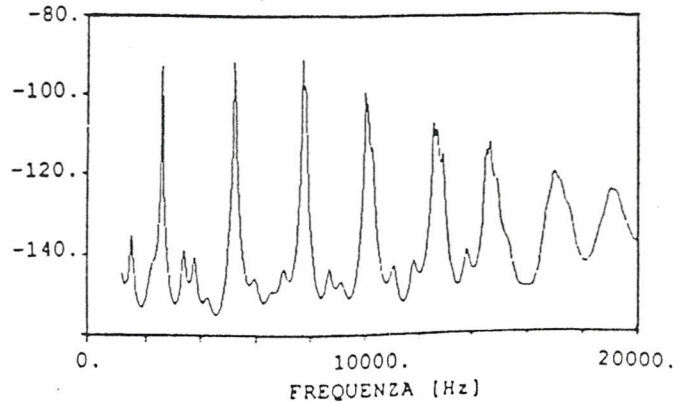


Fig. 10 - Spettro in frequenza calcolato con il modello ad E.F. della barra con discontinuità di 15 mm quando i punti dell'asse sono vincolati a muoversi solamente lungo di esso.

rale, vedi Fig. 11, consente di individuare le creste corrispondenti alle riflessioni dell'onda di perturbazione dovute al taglio.

Queste sono corrispondenti ai diversi percorsi, illustrati nella Fig. 12, che può effettuare l'onda di deformazione. La corrispondenza con i picchi di riflessione presenti nel segnale può essere ricavata, in prima approssimazione, calcolando il tempo che una perturbazione impiega viaggiando lungo i vari percorsi indicati in Fig. 12. Ad esempio, assumendo per la velocità di propagazione dell'onda di deformazione nell'acciaio il valore $c = 5170$ [m/s], (tale assunzione, ottenuta facendo ricorso alla teoria monodimensionale può essere ritenuta valida solo per primi 5-6 modi di vibrare) si ottiene:

$$T_1 = L_1/c = 193.4 \mu\text{s}$$

$$T_2 = L_2/c = 348.1 \mu\text{s}$$

$$T_3 = L_3/c = 425.5 \mu\text{s}$$

$$T_4 = L_4/c = 502.9 \mu\text{s}$$

$$T_5 = L_5/c = 580.3 \mu\text{s}$$

$$T_6 = L_6/c = 735.0 \mu\text{s}$$

$$T_7 = L_7/c = 812.4 \mu\text{s}$$

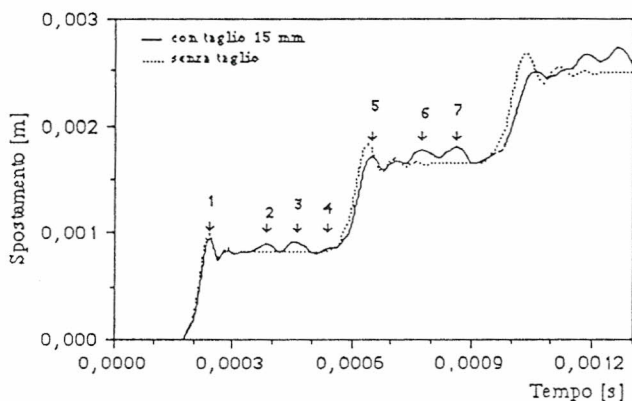


Fig. 11 - Confronto delle risposte temporali calcolate per barra con un taglio di profondità 15 mm e per barra senza taglio.

Le lunghezze sono illustrate nella Fig. 12.

Riassumendo, l'esame dell'andamento temporale ha mostrato che il rilevamento delle riflessioni dell'onda di deformazione può fornire un'utile informazione diagnostica (vedi Fig. 11 e Fig. 5). Nella Fig. 5 si possono osservare due fenomeni, uno legato alle riflessioni dovute al taglio e l'altro, che si manifesta come battimenti di periodo pari circa a 0.0057 s, corrispondenti a 180 Hz. Questi battimenti si presentano come bande laterali nei picchi in frequenza e corrispondono alla Fig. 6d allo sdoppiamento dei picchi caratteristici delle frequenze longitudinali. Nella Fig. 11 i picchi 2,3 e 4, per il primo periodo, 6 e 7 per il secondo, sono riflessioni

d'onda in corrispondenza della discontinuità a 3/5 della lunghezza; la frequenza rappresentativa di tali picchi, come si può desumere dalla Fig. 12, è di circa 13000 Hz, valore che nel caso in esame coincide con la 5ª frequenza longitudinale.

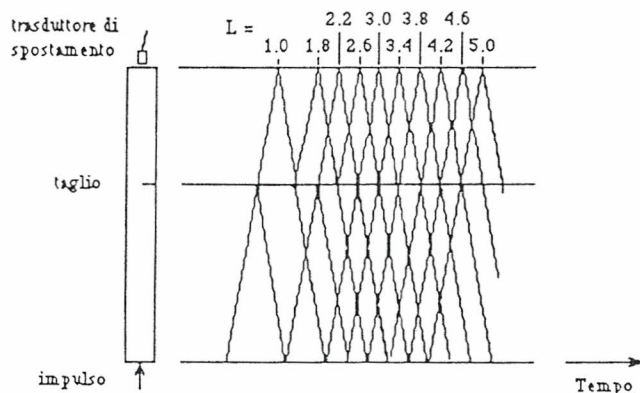


Fig. 12 - Percorsi dell'onda di deformazione riflessa dalla discontinuità e corrispondenti lunghezze L_i

5. CONCLUSIONI

Lo studio condotto in parallelo dai punti di vista sperimentale e numerico ha innanzitutto mostrato l'ottima correlazione tra quanto misurato in laboratorio e quanto determinato mediante analisi ad elementi finiti, confermando studi già fatti sulla validità della modellazione ad E.F. [3].

Gli aspetti diagnostici individuabili dallo spettro di potenza sono tre: la diminuzione delle frequenze proprie, il calo delle ampiezze e la comparsa di nuovi picchi in frequenza.

La diminuzione delle frequenze proprie longitudinali provocato dalla presenza di una discontinuità, è giustificata dal conseguente maggior percorso incontrato che le onde di deformazione devono compiere.

Il variare delle ampiezze, aspetto non apprezzabile con le tecniche a disposizione, teoricamente è imputabile al fatto che la discontinuità modifica le autofunzioni relative ad alcuni tipi e modi di vibrare. Il comparire di nuovi picchi accanto a quelli delle frequenze proprie longitudinali è invece un fenomeno non ancora interpretato. La barra sollecitata dall'impulso vibra secondo modi e tipi che risentono della presenza della discontinuità per il fatto che questa comporta una variazione della geometria; la comparsa di nuovi picchi ne è la manifestazione. Nuovi modi di vibrare assumono rilievo in seguito alla presenza della discontinuità e in questo caso sembrano acquistare molta importanza certe frequenze flessionali, a causa della dissimmetria instaurata dalla discontinuità, come ha mostrato l'analisi con il modello ad E.F. modificato nelle condizioni vincolari per im-

pedire i modi flessionali (vedi Fig. 10).

L'analisi temporale ad E.F. ha permesso di evidenziare ulteriori riflessioni di onde elastiche in seguito a discontinuità che interessano il 17÷30% della sezione.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] American Society for Metals: Non destructive inspection and quality control, Metals Handbook 8th edition, vol. 11.
- [2] L. DOSSI: *Ecomechanical diagnostic method for offshore structures*, Proc. of the 2nd E.C. Symposium - Luxemburg 5-7 dec. 1984.
- [3] F. ANGRILLI, V. COSSALTER, G. FANTI, F. PERALE: *Analisi a scopo diagnostico delle vibrazioni longitudinali in elementi tubolari*, Ingegneria N.3-4, Hoepli, Milano, 1985.
- [4] C. CREE: *The equation of an isotropic elastic solid in polar and cylindrical coordinates, their solution and application*, Transaction of the Cambridge Philosophical Society 1889 v. 14 p. 251-369.
- [5] D. BANCROFT: *The velocity of longitudinal waves in cylindrical bars*, Physical Review 1941 v. 59 p. 588-598.
- [6] J.L. HABERSTAD: *A two dimensional numerical solution for elastic waves in variously configured rods*, Journal of Applied Mechanics 1971 v. 38 p. 62-70.
- [7] G. FANTI: *Ottimizzazione ad elementi finiti di componenti tubolari nell'analisi del transitorio per diagnostica di strutture*. 1985 Ricerche e studi n.97. Istituto di Meccanica Applicata alle Macchine, Università di Padova.
- [8] P.M. CALDERALE, V. VULLO, C.G. MAMMOLA: *Analysis of the stress state due to impulsive loading in cylindrical rods*, Meccanica 1985, v. 20, p. 71-78.
- [9] F. ANGRILLI, G. BERTI, E. BOLLA: *Analisi in frequenza con il metodo della massima entropia*, AIMETA Atti 2°. Convegno Italiano di Meccanica Computazionale 1987, p. 246-251.
- [10] D.P. TEMPIA: *Analisi a scopo diagnostico della propagazione di onde elastiche in barre di acciaio* - Tesi di Laurea A.A. 1984/85, Istituto di Meccanica Applicata alle Macchine. Università di Padova.

ABSTRACT

Aim of this work is to estimate the capability of a diagnostic method to discover structural discontinuities. It is based on the determination of the elastic wave reflections caused by a structural discontinuity.

This preliminary work takes into consideration structural elements consisting in iron rods having partial kerfs with different ratios with respect to the whole section.

Each structural element was excited by impulsive loading acting at one end; the signal output of the sensor was studied in both time and frequency domain.

Further each structural element was represented by tridimensional finite element models; the results of the direct step-by-step integration of the motion equations was both analyzed in the time domain and postprocessed with ARMA techniques in order to obtain the power spectrum with high resolution.

It was found a good agreement between experimental and numerical results.

The power spectrum analysis shows that discontinuities involving at least 30% of the whole section are surely detectable. The finite element time analysis confirm that it is possible to discover the appearance of a discontinuity when it affects at least the 17% of the whole section.