

IGF 11-XI Convegno Nazionale
Gruppo Italiano Frattura
Brescia, 4-6 luglio 1995

RICERCHE SPERIMENTALI SULLA RISPOSTA AD IMPATTO DI PROVINI DANNEGGIATI

Autori: A.Mondina,L.Daverio,F.Orsenigo,M.Sangirardi.

Dipartimento di Meccanica
POLITECNICO DI MILANO

SOMMARIO: Tra i metodi di controllo non distruttivo utilizzati nella diagnostica industriale, quelli che si fondano sulle analisi delle vibrazioni si segnalano particolarmente per la loro attitudine a fornire indicazioni di natura globale sulla integrità della struttura in esame, anche quando gli eventuali difetti siano disposti in posizioni difficilmente accessibili. In questo ambito di problemi si inserisce il nostro lavoro, che mira a un controllo globale ricercando possibili cambiamenti delle vibrazioni indotte appositamente nella struttura da un carico di tipo impulsivo per la presenza di un difetto al suo interno.

La nostra ricerca è consistita nell' eseguire numerose prove per registrare sperimentalmente il comportamento dinamico sia di provini integri sia di provini intagliati; modellando poi analiticamente la trave criccata è stato possibile eseguire un controllo dei risultati ottenuti. Infine si è sviluppato un procedimento che permette, partendo dalla rilevazione sperimentale della risposta in frequenza, di risalire a dimensione e ubicazione della cricca.

1. INTRODUZIONE

Tra i metodi di controllo non distruttivo utilizzati nella diagnostica industriale, quelli che si fondano sulle analisi delle vibrazioni si segnalano particolarmente per la loro attitudine a fornire indicazioni di natura globale sulla integrità della struttura in esame, anche quando gli eventuali difetti siano disposti in posizioni difficilmente accessibili. In questo ambito di problemi si inserisce il nostro lavoro, che mira a un controllo globale ricercando possibili cambiamenti delle vibrazioni indotte appositamente nella struttura da un carico di tipo impulsivo per la presenza di un difetto al suo interno.

Nella letteratura da noi consultata la maggior parte delle memorie sono indirizzate a definire il comportamento dinamico in strutture semplici in presenza di difetti; il lavoro inverso, cioè dall'analisi dinamica risalire a posizione e profondità di cricca, è stato portato a termine solo in [1] dove si illustra un metodo basato sull'analisi modale.

La nostra ricerca ha inteso sviluppare un metodo più semplice (basato sull'analisi in frequenza) e facilmente applicabile anche al di fuori di un laboratorio. Per la messa a punto del metodo si è sperimentato su provini a forma di barra a sezione rettangolare, sottoposti ad eccitazione impulsiva mediante un martelletto dinamometrico.

Si sono eseguite numerose prove per registrare sperimentalmente il comportamento dinamico sia di provini integri sia di provini intagliati; modellando poi analiticamente la trave criccata è stato possibile eseguire un controllo dei risultati ottenuti.

Infine si è sviluppato un procedimento che permette, partendo dalla rilevazione sperimentale della risposta in frequenza, di risalire a dimensione e ubicazione della cricca.

2. DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE E DEI PROVINI

Negli esperimenti svolti sono state eccitate piccole travi a sezione rettangolare, sia integre, sia intagliate manualmente mediante l'uso di un sottile seghetto per metalli. L'eccitazione è stata prodotta da carichi impulsivi introdotti mediante un martelletto strumentato con un accelerometro piezoelettrico che permette di conoscere lo spettro della forzante; la risposta dinamica della struttura eccitata è stata rilevata mediante un altro piezoaccelerometro incollato al provino.

I segnali relativi alla forzante e alla risposta sono stati quindi analizzati ed elaborati mediante un analizzatore di spettro bicanale.

Il martelletto tipo PCB modello 086C03 è dotato di una massa intercambiabile (ciò ha lo scopo di poter variare il contenuto energetico dell'impatto); è possibile variare la sua configurazione geometrica mediante prolunghe (per raggiungere zone di difficile accesso), ed è anche possibile sostituire la punta d'impatto con altre di differente rigidità.

Nelle Fig. 1 e 2 sono mostrati uno schema della catena di misura e la tabella delle caratteristiche del martelletto.

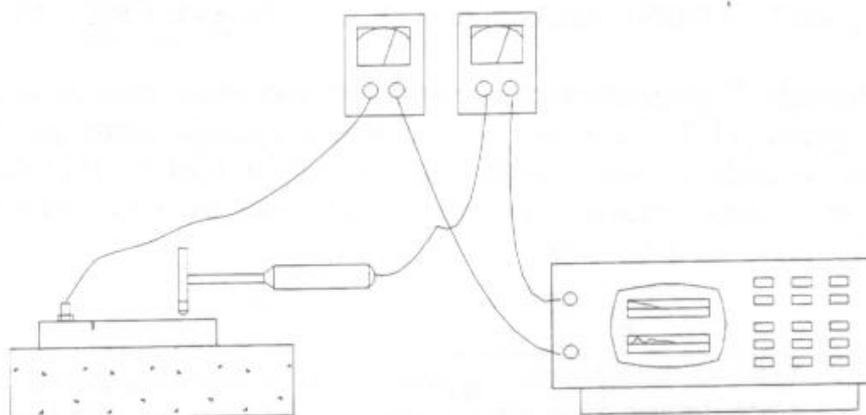


Fig. 1. Schema della catena di misura

MARTELLO	
MASSA AGGIUNTIVA MARTELLO	77,1343 gr.
ACCELEROMETRO	
SENSIBILITÀ' VERA	10mV/g
SENSIBILITA' ALLE ACCELERAZIONI TRASVERSALI	0,5 %
FREQUENZA DI RISONANZA	43,5 KHz
ARCO DI UTILIZZO	± 500 g
RISOLUZIONE	0,01 g

Fig.2 Caratteristiche del martello

3. INDAGINE PRELIMINARE SULLE CONDIZIONI DI PROVA

Il comportamento dinamico di una struttura è ovviamente determinato anche dalle condizioni al contorno, che influenzano a loro volta la forma e soprattutto la ripetibilità della forzante. In via preliminare abbiamo effettuato prove comparative sulle condizioni di vincolo del provino e sull'influenza che esse esercitano sulla forzante.

Da questa serie di esperimenti si è concluso che, al fine di avere la migliore ripetibilità dello spettro della martellata (anche quando questa non venga sempre data nello stesso punto), è preferibile sospendere il provino ad un filo od appoggiarlo su un letto in gommapiuma. Queste due situazioni si rivelano essere generalmente equivalenti.

Ricorrendo invece all'incastro di una estremità del provino, varia l'arco delle frequenze eccitate al variare della distanza del punto d'impatto dall'incastro.

In conseguenza di ciò e per comodità sperimentale si è deciso di adottare il vincolo costituito da appoggio su gommapiuma.

4. MODELLAZIONE ANALITICA DI UNA TRAVE CRICCATA.

Per valutare analiticamente il comportamento dinamico di una trave criccata ci siamo basati sull'approccio di Dimarogonas [1], [2], che modella la sezione criccata come una molla di costante flessionale K ricavata secondo i metodi della meccanica della frattura [1]. Infatti per vibrazioni flessionali piane (nel piano della forzante e dell'asse longitudinale della trave) risulta preponderante la rigidità (quella rappresentata dalla molla)

$$K = \frac{E \cdot b^3 \cdot h^3}{6 \cdot \int_0^a \left[\sqrt{\frac{2h}{\pi a} \cdot \operatorname{tg} \frac{\pi a}{2h}} \cdot \frac{0.923 + 0.199 \cdot \left[1 - \operatorname{sen} \frac{\pi a}{2h} \right]^4}{\cos \frac{\pi a}{2h}} \right]^2 \cdot \frac{\pi a}{h} \cdot da} \quad (1)$$

Essendo E il modulo di Young, a, b, h come da figura 5, m la massa per unità di lunghezza. La trave criccata viene quindi schematizzata come nella fig. 4

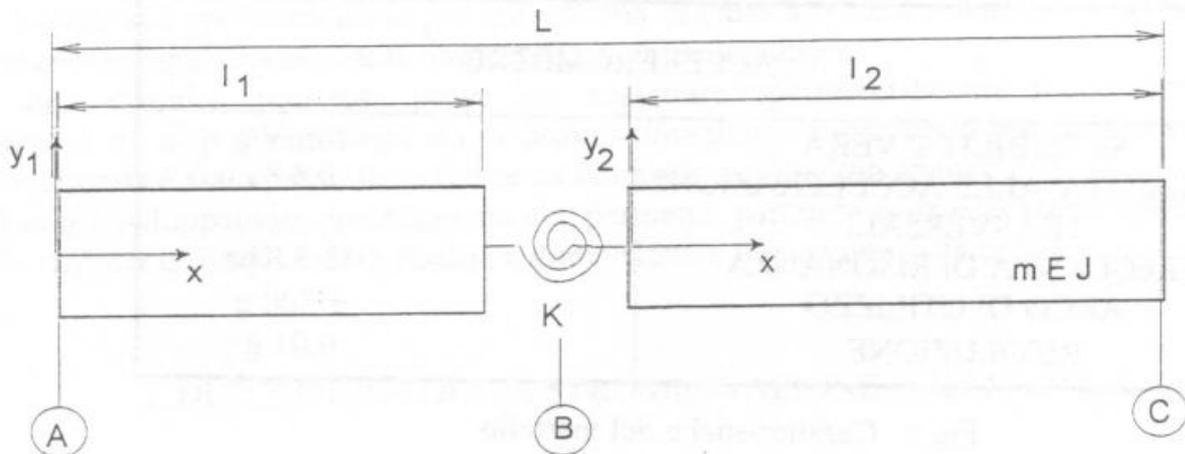


Fig.3 schematizzazione del provino criccato.

Lo schema di vincolo imposto nel calcolo corrisponde alla condizione di trave libera - libera; condizione non molto lontana da quella di appoggio su gommapiuma adottata in sede sperimentale. Lo studio delle vibrazioni di una simile trave può essere condotto con metodi classici partendo dalla equazione di Eulero - Bernoulli,

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = -\rho A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (2)$$

di cui è nota la soluzione a regime

$$y = y(x, t) = (A \cdot \cos \gamma x + B \cdot \operatorname{sen} \gamma x + C \cdot \operatorname{ch} \gamma x + D \cdot \operatorname{sh} \gamma x) \cdot e^{i\omega t} \quad (3)$$

Imponendo le condizioni al contorno ai due tratti di trave si ottiene un sistema di 8 equazioni nelle 8 costanti $A_1, B_1, C_1, D_1, A_2, B_2, C_2, D_2$ che in forma matriciale è:

$$[h_{i,j}(\omega)] \cdot \{z_i\} = 0$$

dove $\{z_i\}$ è il vettore delle costanti $A_1, B_1, C_1, D_1, A_2, B_2, C_2, D_2$.

Affinché tale sistema dia soluzione non nulla deve essere $\det[h_{i,j}(\omega)] = 0$, equazione trascendente che fornisce le infinite ω proprie della trave.

5. RISULTATI SPERIMENTALI.

Abbiamo effettuato misure sperimentali su vari provini caratterizzati da intagli di differenti profondità ed ubicazioni. Le frequenze proprie misurate sono state inoltre confrontate con quelle ottenute dal calcolo col metodo prima esposto, osservando uno scostamento tra i due valori inferiore all'1.5%. Nella fig.4 sono mostrati gli andamenti degli spettri di frequenze vibratorie di un provino con intaglio che interessa il 40% della sua sezione e, per confronto, di un provino uguale integro. Si è osservato uno spostamento dei valori delle frequenze proprie superiore al 10%.

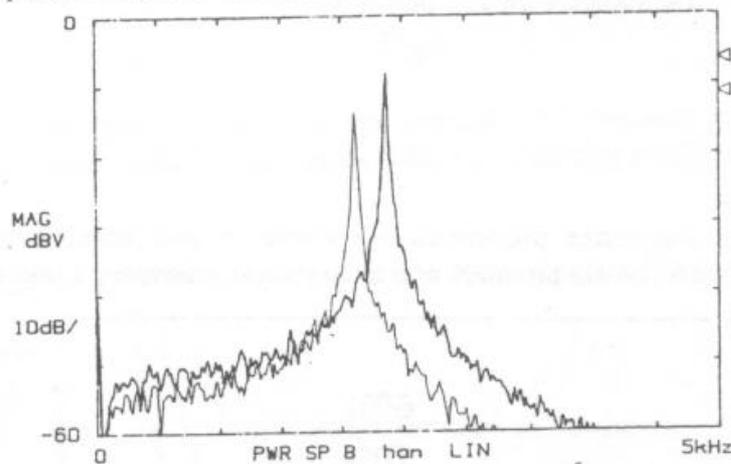


Fig.4

6. ANALISI DEI DIFETTI DALLE RILEVAZIONI SPERIMENTALI.

La misura delle modificazioni delle caratteristiche di vibrazione della trave può permettere all'inverso anche una semplice valutazione della posizione e la profondità di una cricca o unica o prevalente su altre, come avviene nella buona maggioranza dei casi.

Infatti se i termini della matrice $[h_{i,j}(f)]$ (ricavata dalla $[h_{i,j}(\omega)]$ con la sostituzione $\omega=2\pi f$) definita nel precedente paragrafo sono adimensionalizzati (indicando con $0 = l_1/L$ la posizione adimensionalizzata della cricca e $\delta = a/h$ la sua profondità adimensionalizzata)

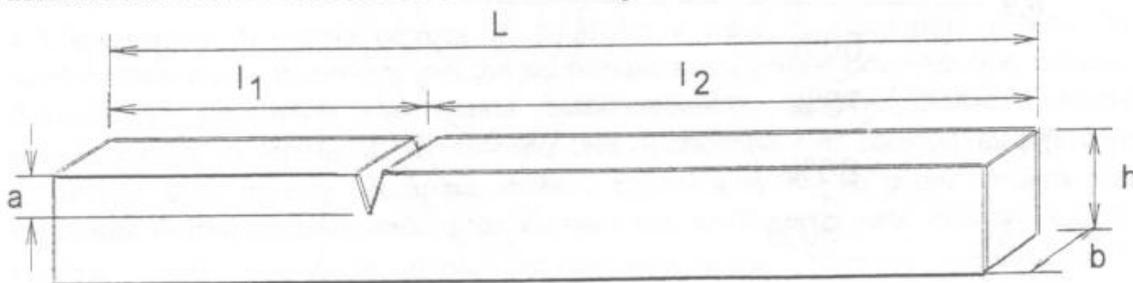


Fig.5 Misure fondamentali del generico provino utilizzato.

$$l_1 = o \cdot L$$

$$l_2 = (1 - o) \cdot L$$

la condizione $\det[h_{i,j}(f)] = 0$ fornisce un legame tra le tre variabili f , o , δ (frequenza, ubicazione e profondità di cricca adimensionalizzate) del tipo $F(f,o,\delta) = 0$.

La funzione $F(f,o,\delta) = 0$ calcolata per una determinata frequenza f (ridotta in percentuale rispetto a quella relativa al provino integro) rappresenterà il luogo delle posizioni d'apice della cricca relative a questa frequenza di vibrazione, in altri termini, cricche singole, caratterizzate da diversa profondità e ubicazione, comportano uguali riduzioni di frequenza se i loro apici giacciono su tali curve.

E' comodo, a scopo diagnostico, costruire un abaco di curve parametrizzate in riduzioni percentuali della frequenze proprie della trave integra, calcolate con la formula :

$$f = \frac{\chi_n \cdot n^2 \cdot \pi^2}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{EJ}{\rho A}} \cdot 2\pi \quad \text{con } n \text{ ordine dell'armonica considerata}$$

$$\chi_1 = 2.27$$

$$\chi_2 = 1.56$$

$$\chi_3 = 1.36$$

$$\chi_4 = 1.26$$

Ragionando con le prime frequenze proprie, da tali curve si può immediatamente risalire alla profondità della cricca nel caso che sia possibile con altro metodo rilevarne l'ubicazione

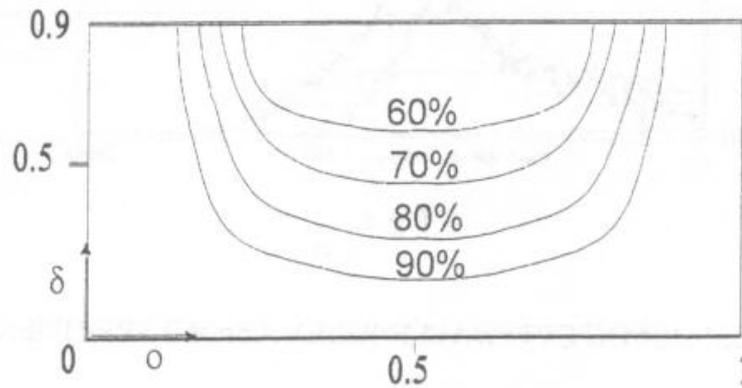


Fig.6

Ripetendo ora il procedimento fin qui svolto anche per la seconda frequenza propria, otteniamo una famiglia di curve come da fig. 7

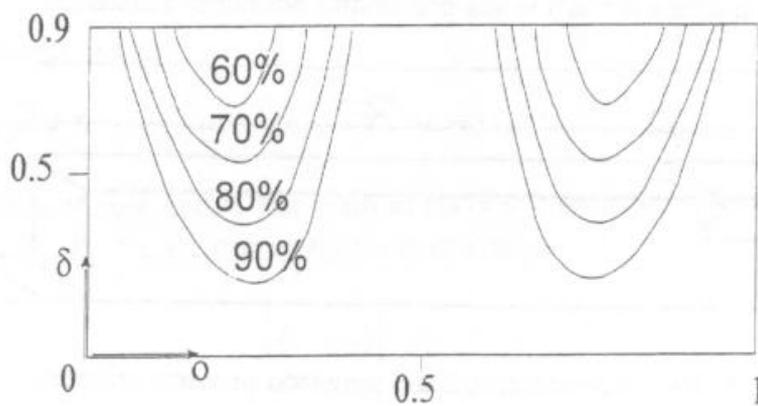


Fig.7

La determinazione sperimentale delle prime due frequenze proprie consente di trovare le corrispondenti curve di riduzione di frequenze, che, alla loro intersezione, indicano le due possibili e simmetriche ubicazioni e la profondità della cricca.

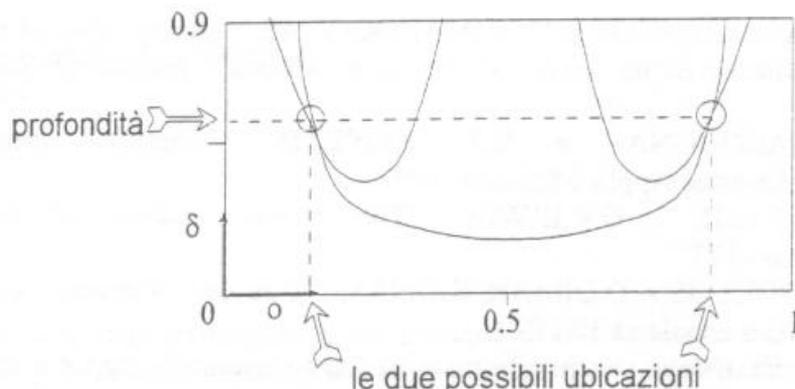


Fig. 8

Tale metodo è stato sottoposto a verifiche sperimentali ed è risultato che l'errore massimo nella definizione della profondità della cricca è circa dello 6,6% mentre quello relativo alla sua ubicazione circa dell' 1,6%.

Al fine di dare maggiore generalità ai diagrammi, è opportuno parametrizzarli in γl e non più in f , dove
ed l = lunghezza trave.

$$\gamma = \sqrt{2\pi f} \cdot \left(\frac{m}{EJ}\right)^{\frac{1}{4}}$$

m = massa per unità di lunghezza

J = momento d'inezia della sezione

7. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

I risultati ottenuti permettono di fare alcune considerazioni conclusive.

- Il metodo esposto ha consentito di cogliere con strumentazione abbastanza semplice e facilmente trasportabile difetti singoli in travi di piccole dimensioni, nelle quali l'insorgere di cricche viene evidenziato con buona sensibilità; meglio sono avvertite le cricche poste in posizione centrale della trave e con minore sensibilità quelle disposte in prossimità degli estremi.

- L'estensione di questa tecnica di controllo a travi di dimensioni diverse da quelle da noi sperimentate non è immediata perchè sul terreno sperimentale occorrerebbe, nel caso di grandi travi, disporre di percussori con massa sufficientemente elevata; inoltre l'utilizzo degli abachi parametrizzati in termini di γl (essendo tale operazione non completamente corretta, in quanto all'interno della matrice compare anche il solo γ a fattore di taluni termini) porta a valutare le variazioni di frequenza in modo approssimato con scarti che si sono mostrati minori del 2% rispetto a quelli ottenibili con abachi calcolati per ogni singola trave, considerando travi con J da 1cm^4 a 1m^4 e di lunghezza da un minimo di 10cm fino a 10m.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] P.F. RIZOS, N. ASPARGATOS, A.D. DIMAROGONAS: "Identification of Crack Location and Magnitude in a Cantilever Beam from the Vibration Modes"; Journal of Sound and Vibration (1990), pag. 381-388.
- [2] A.D. DIMAROGONAS e S.A. PAIPETIS : "Analytical Methods in Rotor Dynamics". London: Elsevier Applied Science, 1993
- [3] H. TADA, P.C. PARIS, G.R. IRWIN : "The Stress Analysis of Cracks Handbook" ; Hellerton, Pennsylvania 1973
- [4] C.A. PAPADOPOULOS, A.D. DIMAROGONAS: "Coupled Vibration of Cracked Shafts" , Journal of vibrations and acoustics 10/1992
- [5] G.L. LAPINI : "Risultati delle misure effettuate su rotore criccato" ; rapporto finale CISE n2990;
- [6] L. DAVERIO, F. ORSENIGO: "Ricerche sperimentali sulla risposta ad impatto di provini danneggiati"; Elaborato di Laurea , Milano 22/2/1995
- [7] R.B. RANDALL: "Frequency Analysis"; B & K Denmark 1977
- [8] H.S. JING, V.H. KENNER: "Flaw Evaluation in Laminated Structures by an Instrumented Tapping Method"; Materials evaluation 2/1992;