

INDAGINI DINAMICHE SPERIMENTALI PER LE STRUTTURE DA PONTE

Marco BOZZA *

* *Ingegnere Strutturale, già Direttore della Federazione regionale degli Ordini degli Ingegneri del Veneto (FOIV), Amministratore di ADEPRON*

INTRODUZIONE

Negli ultimi venti anni i metodi di caratterizzazione dinamica delle strutture hanno ricevuto un notevole impulso strettamente connesso all'evoluzione tecnologica della strumentazione di misura, più precisa e meno costosa, e alla crescente diffusione di mezzi di calcolo automatico sempre più efficienti, che hanno contribuito in modo determinante alla riduzione dei tempi di elaborazione ed interpretazione dei dati sperimentali. Nell'ambito delle indagini sperimentali comunemente intraprese, un posto di rilievo occupano quelle rivolte allo studio di strutture da ponte. La corretta applicazione delle tecniche di indagine dinamica e la relativa interpretazione dei risultati richiede la sintesi di conoscenza provenienti da due ambiti disciplinari differenti: la dinamica delle strutture e l'analisi spettrale.

IMPORTANZA DELLE PROVE DINAMICHE

Tra i metodi sperimentali correntemente utilizzati per effettuare la caratterizzazione di un sistema in scala reale, le prove dinamiche costituiscono la procedura più completa ed affidabile. In quest'ambito, sono in genere utilizzati metodi derivanti dall'interpretazione di vibrazioni indotte da sisma o da traffico. Nel caso di ponti e viadotti, una prova dinamica consiste in una procedura sperimentale atta a determinare un insieme di parametri caratteristici del comportamento dinamico (globale e locale). Tali parametri sono le frequenze naturali della struttura, le deformate modali corrispondenti ed i valori di smorzamento associati. I parametri in tal modo valutati sono normalmente utilizzati per mettere a punto dei modelli strutturali, tipicamente ad elementi finiti, dotati di un grande numero di gradi di libertà al fine di rappresentare adeguatamente la distribuzione di masse e rigidità del sistema.

Tuttavia, i parametri di rigidità delle modellazioni strutturali non sono di solito identificabili, a meno di non disporre di un'accurata valutazione delle forme modali e quindi di un elevato numero di stazioni di misura sulla struttura. Comunque, la conoscenza di queste grandezze modali può utilizzarsi sia indirettamente per verificare le assunzioni teoriche di progetto, che direttamente per controllare le prestazioni del sistema strutturale durante la sua fase di esercizio. Le finalità e i campi di applicazione delle indagini dinamiche su strutture da ponte possono essere molteplici.

In particolare tra i possibili campi di utilizzo dei risultati dell'analisi modale sperimentale quelli di maggiore interesse sono:

- *validazione di modelli numerici;*
- *individuazione di eventuali danneggiamenti strutturali.*

Validazione di modelli numerici

L'utilizzo della sperimentazione modale per valutare l'attendibilità del modello numerico di calcolo (di verifica o di progetto) viene stabilita in base al confronto tra i parametri modali determinati sperimentalmente e i corrispondenti valori teorici scaturiti dall'analisi dinamica.

Individuazione di eventuali danneggiamenti strutturali

La sperimentazione dinamica consente di individuare eventuali danneggiamenti strutturali che potrebbero avere interessato il ponte, conducendo un confronto tra i risultati di due indagini dinamiche sulla stessa struttura (una precedente al verificarsi del danno e una successiva al danno).

In entrambe le applicazioni si eseguono delle tecniche di confronto significative tra due serie di parametri modali che nel primo caso sono una di derivazione numerica e l'altra di tipo sperimentale, mentre nel secondo caso entrambe le serie provengono dalla sperimentazione.

OBIETTIVI DELLE INDAGINI DINAMICHE SPERIMENTALI

Come detto inizialmente le prove di vibrazione su strutture reali rappresentano il metodo più affidabile per effettuare la *caratterizzazione dinamica*, o *identificazione strutturale*, (normalmente in termini di parametri modali), oltre che per verificare le ipotesi adottate in modelli teorici o numerici. La tendenza attuale riguardo all'utilizzo di queste indagini è quella di un controllo sistematico dell'opera mediante rilievi dinamici, anche e particolarmente durante la fase di costruzione al fine di assumere le informazioni che consentano di chiarire almeno i principali fattori d'incertezza.

Inoltre, ciò consente di ottimizzare le analisi strutturali sostituendo ai parametri iniziali e teorici di progetto quelli “reali” individuati dalla sperimentazione. Questa procedura va estesa anche alla fase di collaudo che dovrà individuare le caratteristiche globali dell’opera e al monitoraggio che dovrà verificare nel tempo l’invarianza di tali caratteristiche. Riassumendo, le prove dinamiche vanno eseguite nelle seguenti tre fasi di vita della struttura:

- fase di costruzione (sperimentazione);
- fase di fine costruzione (collaudo);
- fase di esercizio (controllo strutturale).

Fase di costruzione

Le prove di vibrazione in fase di costruzione (sperimentazione) sono utilizzate per diversi impieghi:

- valutazione dell’importanza dei fenomeni d’interazione terreno-struttura;
- verifica della corrispondenza degli elementi portanti verticali alle ipotesi di progetto;
- controllo dell’evoluzione di particolari schemi statici;
- identificazione di eventuali difetti di costruzione;
- taratura di modelli numerici di progetto.

Fase di fine costruzione

La sperimentazione in scala reale a fine costruzione (collaudo) ha la funzione di caratterizzare la struttura all’atto della sua entrata in esercizio. È importante precisare che sebbene la sperimentazione dinamica sia in grado di fornire una caratterizzazione della struttura più completa e dettagliata di una prova statica convenzionale, è opportuno eseguire comunque la prova statica di collaudo, in quanto raggiungendo un livello di sollecitazione prossimo a quello di progetto, consente di valutare l’estensione del comportamento elastico del sistema e quindi le sue caratteristiche di resistenza. Infatti, le sollecitazioni indotte durante una prova dinamica sono sensibilmente inferiori rispetto a quelle di una prova statica. Ciò è dovuto al fatto che per stimare i parametri modali (dai quali è possibile ottenere indirettamente informazioni sulla distribuzione di masse e rigidezze), è normalmente sufficiente indurre eccitazioni di intensità medio-bassa.

Fase di esercizio

Nella fase di esercizio (controllo strutturale) le prove dinamiche ad intervalli regolari consentono di valutare lo stato di conservazione dell’opera o identificare eventuali condizioni di danneggiamento.

RICHIAMI DI ANALISI MODALE DELLE TRAVI

Per introdurre i concetti fondamentali che stanno alla base dell’analisi modale sperimentale si richiamano brevemente le equazioni dinamiche che governano il moto di un impalcato da ponte (nell’intorno della sua configurazione di equilibrio statico), ipotizzando che esso possa essere descritto come un modello a trave a una sola campata. Si analizza di seguito la risposta dinamica del sistema nel dominio del tempo.

Com’è noto l’equazione del moto dello spostamento verticale $u(x,t)$ di una trave lunga L sottoposta all’azione di un generico carico $p(x,t)$ si scrive come (nelle usuali ipotesi della Scienza delle Costruzioni):

$$(1) \quad m(x) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c(x) \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EJ(x) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right] = p(x,t)$$

con $m(x)$, $c(x)$, $J(x)$, rispettivamente, la massa, lo smorzamento viscoso, il momento d’inerzia della sezione trasversale per unità di lunghezza, ed E il modulo elastico del materiale costituente la trave.

L’evoluzione temporale della risposta $u(x,t)$, per il *principio di sovrapposizione modale*, può essere scritta nella forma (sistema continuo):

$$(2) \quad u(x,t) = \sum_{r=1}^{\infty} \phi_r(x) q_r(t)$$

essendo $\phi_r(x)$ la generica forma modale (modo di vibrare) e $q_r(t)$ la relativa funzione dipendente solo dal tempo (r -esima coordinata principale associata all’ r -esimo modo di vibrare). Tenendo conto delle (1) e (2), e ricordando le proprietà di ortogonalità e normalizzazione rispetto alla massa delle forme modali:

$$(3) \quad \int_L \phi_s(x) \phi_r(x) dx = 0 \quad s \neq r$$

$$(4) \quad \int_L m(x) \phi_r^2(x) dx = 1$$

per ogni r -esima coordinata principale vale l’equazione seguente:

$$(5) \quad \frac{\partial^2 q_r(t)}{\partial t^2} + 2\zeta_r \omega_r \frac{\partial q_r(t)}{\partial t} + \omega_r^2 q_r(t) = p_r(t)$$

dove si è posto:

$$(6) \quad 2\zeta_r \omega_r = \int_L c(x) \phi_r^2(x) dx$$

$$(7) \quad \omega_r^2 = \int_L \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[E J(x) \frac{\partial^2}{\partial x^2} \phi_r(x) \right] \phi_r(x) dx$$

$$(8) \quad p_r(t) = \int_L p(x, t) \phi_r(x) dx$$

Come si vede immediatamente, la (5) rappresenta (per ogni r-esima coordinata principale) l'equazione del moto di un oscillatore ad un grado di libertà di massa unitaria con smorzamento viscoso modale pari a $2\zeta_r \omega_r$, rigidità elastica modale pari a ω_r^2 e soggetto al carico modale $p_r(t)$. La soluzione della (5) può ottenersi integrando nel tempo la risposta all'impulso istantaneo $p_r(\tau) d\tau$:

$$(9) \quad q_r(t) = \int_0^t h_{nr}(t - \tau) p_r(\tau) d\tau$$

Nella (9) $h_{nr}(\tau)$ è la soluzione in termini di spostamento, dell'r-esimo modo di vibrare, dovuta ad un impulso unitario:

$$(10) \quad h_{nr}(\tau) = \exp(-\zeta_r \omega_r \tau) \sin(\omega_{nr} \tau)$$

essendo:

$$(11) \quad \omega_{nr} = \omega_r \sqrt{1 - \zeta_r^2}$$

Dalla (2) la risposta del sistema in termini di spostamento, velocità e accelerazione vale allora:

$$(12) \quad u(x, t) = \sum_{r=1}^{\infty} \phi_r(x) \int_0^t h_{nr}(t - \tau) p_r(\tau) d\tau$$

$$(13) \quad \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = \sum_{r=1}^{\infty} \phi_r(x) \int_0^t \frac{\partial}{\partial t} [h_{nr}(t - \tau)] p_r(\tau) d\tau$$

$$(14) \quad \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} = \sum_{r=1}^{\infty} \phi_r(x) \int_0^t \frac{\partial^2}{\partial t^2} [h_{nr}(t - \tau)] p_r(\tau) d\tau$$

ESECUZIONE E INTERPRETAZIONE DELLE PROVE DINAMICHE

Le modalità d'indagine dinamica, d'impiego più ricorrente per le strutture da ponte, possono classificarsi, in base al tipo di eccitazione utilizzata, come:

- prove con eccitazione impulsiva;
- prove con eccitazione forzata artificiale;
- prove con eccitazione da cause ambientali.

Queste tre differenti modalità di prova possono applicarsi indifferentemente in fase di costruzione, di fine costruzione e di esercizio.