

Un sistema di acquisizione basato su tecnologia MEMS per il monitoraggio strutturale

Descrizione delle prove dinamiche sul "Manhattan Bridge" di New York

Marco Savoia

Professore Ordinario di Tecnica delle Costruzioni all'Università di Bologna

Loris Vincenzi

Ricercatore di Tecnica delle Costruzioni all'Università di Modena e Reggio Emilia

Il monitoraggio strutturale (Structural Health Monitoring - SHM) è il processo di caratterizzazione delle strutture esistenti con il quale ci si propone di identificare alcune proprietà della struttura, in modo da avere informazioni sulla struttura reale con le quali potere mettere a punto modelli analitici per la valutazione dello stato della struttura o per poter valutare cambiamenti nel comportamento strutturale. L'installazione di un sistema di monitoraggio su edifici di maggior rilevanza storica, culturale e sociale, edifici pubblici, strutture produttive e consente, in primo luogo, di creare una sorta di "anagrafe strutturale" degli edifici monitorati che potrebbe risultare di grande valore anche per gli interventi di ripristino che verranno effettuati nel futuro. Gli aspetti più rilevanti, inoltre, riguardano non solo la sicurezza degli edifici più critici (ospedali, scuole, strutture pubbliche), ma di "Early Warning". In ambito sismico sta diventando un'esigenza sempre più pressante quella di avere la possibilità di un preallarme che, nel caso in cui alcuni parametri di scuotimento del suolo superano una soglia di pericolo prestabilita, si possa intervenire automaticamente sospendendo attività potenzialmente pericolose, sia in abito civile che industriale (si pensi ad esempio che numerosi danni possono essere provocati da fughe di gas in edifici o dalla rottura di impianti in funzione in ambito industriale o, infine, per la salvaguardia di attrezzature e macchinari che, in funzione durante un sisma, potrebbero danneggiarsi). Inoltre, altri aspetti non meno rilevanti sono associati alla riduzione dei costi di manutenzione, ad esempio di ponti, a causa di problemi di fatica (con controlli mirati e solo quando realmente necessari).

La necessità di avere una strumentazione efficiente e flessibile ma semplice nella sua installazione, per essere utilizzata in applicazioni strutturali in abito civile, ha incentivato una collaborazione tra Centro Interdipartimentale per la Ricerca e l'Innovazione (C.I.R.I.), l'Università di Bologna, l'Università di Modena e Reggio Emilia e la Teleco s.p.a., per la produzione di un sistema SHM. Il sistema è un'evoluzione dei sistemi tradizionali in quanto è un sistema a "intelligenza distribuita" che effettua molte elaborazioni locali nei singoli punti di misura; inoltre utilizza un efficace e poco invasivo bus digitale tra sensori e unità di memorizzazione dei dati. Il sistema, infine, rende accessibili tutti i dati raccolti via rete rendendo possibile, da qualunque punto di accesso ad Internet, il controllo di edifici situati ovunque.

L'occasione per un significativo campo di prova del sistema di monitoraggio è nata a seguito di una collaborazione tra l'Università di Bologna la Columbia University di New York sui problemi a fatica del "Manhattan Bridge", assieme al più famoso ponte di Brooklyn uno dei principali ponti della "City". Lo scopo del monitoraggio del ponte è la verifica a fatica degli elementi di controventamento dell'impalcato, valutandone la vita utile e per potere svolgere controlli specifici nell'ottica di un'ottimizzazione delle risorse. Per raggiungere questo scopo, il primo passo è mettere a punto un modello numerico del ponte il cui comportamento sia più simile possibile al comportamento della struttura al vero; la determinazione delle caratteristiche modali e meccaniche è effettuata a partire dalle registrazioni ottenute dal sistema di monitoraggio.

Nell'articolo vengono descritte le prove effettuate sul Manhattan Bridge, con descrizione della strumentazione, al layout di prova ed a risultati preliminari per quanto riguarda le caratteristiche modali della struttura.

1 INTRODUZIONE

Il mantenimento in esercizio di strutture e infrastrutture civili, quali viadotti ed edifici richiede un'attenta strategia che permetta di mantenere efficiente la struttura e con un alto livello di sicurezza ma, al tempo stesso, limitandone i costi di manutenzione. Il problema diventa ancor più rilevante quando sia necessaria la valutazione del livello prestazionale di strutture potenzialmente danneggiate da eventi traumatici, quali gli eventi sismici. Allo stesso tempo, la salvaguardia dell'immenso patrimonio architettonico-culturale, rappresentato dai centri storici di moltissime città italiane, richiede un'attenta sorveglianza del suo stato di salute strutturale e degli effetti dell'attuale crescente livello di traffico veicolare.

Il monitoraggio strutturale (Structural Health Monitoring - SHM) è il processo di caratterizzazione delle strutture esistenti con il quale ci si propone di identificare alcune proprietà della struttura, in modo da avere informazioni sulla struttura reale con le quali mettere a punto modelli analitici per la valutazione dello stato della struttura o per poter valutare cambiamenti nel comportamento strutturale, quali danneggiamenti del materiale o di elementi strutturali, modifiche del comportamento di vincoli e sistemi di connessione, o altre modifiche che possono causare variazioni delle performance della struttura.

Tra i progetti portati sul Tavolo Innovazione e Sviluppo del Piano Strategico Metropolitan di Bologna vi è anche quello relativo alla realizzazione di una rete di monitoraggio SHM. L'idea è quella di dotare gli edifici e torri di maggior rilevanza storica, culturale e sociale della città di sistemi SHM per tenere aggiornato, attraverso la rete, un data base in grado di fornire un quadro aggiornato in tempo reale dello stato di tali costruzioni. Questo sistema consentirebbe di creare una sorta di "anagrafe strutturale" degli edifici storici che potrebbe risultare di grande valore anche per gli interventi di ripristino che verranno effettuati nel futuro. Le ricadute riguardano piani diversi. Il più rilevante è quello della sicurezza degli edifici più critici (ospedali, scuole, strutture pubbliche), ma vi sono anche altri aspetti meno appariscenti. In ambito sismico sta diventando un'esigenza sempre più pressante quella di avere la possibilità di un "Early Warning", ovvero di un preallarme che, nel caso in cui alcuni parametri di scuotimento del suolo superano una soglia di pericolo prestabilita, si possa intervenire sospendendo attività potenzialmente pericolose, sia in ambito civile che industriale (si pensi ad esempio che numerosi danni possono essere provocati da fughe di gas in edifici o dalla rottura di impianti in funzione in ambito industriale o per la salvaguardia di attrezzature e macchinari che, in movimento, potrebbero danneggiarsi). Inoltre, altri aspetti non meno rilevanti sono associati alla riduzione dei costi di manutenzione di ponti, ad esempio a causa di problemi di fatica (con controlli mirati e solo quando realmente necessari) e quello della rilevazione delle caratteristiche strutturali degli edifici storici, ai fini della loro conservazione nel tempo.

Un processo di monitoraggio prevede la misura di alcune grandezze nel tempo, in continuo o con un intervallo di tempo prestabilito, attraverso una serie di sensori posti in posizioni prestabilite sulla struttura, che possano poi fornire le informazioni necessarie alla valutazione del comportamento strutturale. Le moderne metodologie di monitoraggio strutturale sfruttano lo sviluppo di nuove tecniche numeriche d'identificazione strutturale e l'adozione di sensori sempre più sofisticati ed intelligenti capaci, non solo di eseguire l'acquisizione dei dati, ma anche di elaborare direttamente i dati mediante tecniche di filtraggio, eseguire localmente identificazioni di modelli e fornire direttamente all'utente informazioni sullo stato della struttura.

La necessità di avere una strumentazione efficiente e flessibile ma semplice nella sua installazione, per essere utilizzata in applicazioni strutturali in abito civile, ha incentivato una collaborazione tra Centro Interdipartimentale di Ricerca e Innovazione (C.I.R.I.) dell'Università di Bologna – settore Edilizia e Costruzioni –, il dipartimento di Elettronica, Informatica e Sistemistica l'Università di Bologna, il dipartimento Enzo Ferrari dell'Università di Modena e Reggio Emilia e la Teleco s.p.a., per la produzione di un sistema SHM. Il C.I.R.I. ha come finalità proprio il trasferimento delle conoscenze dall'ambiente accademico a quello industriale e il sistema di monitoraggio sviluppato ne è un buon esempio. Il sistema, denominato SHM602, è un'evoluzione dei sistemi tradizionali in quanto è un sistema a “intelligenza distribuita” che effettua molte elaborazioni locali nei singoli punti di misura; inoltre utilizza un efficace e fisicamente poco invasivo bus digitale anziché una serie di collegamenti analogici radiali tra sensori e unità di memorizzazione dei dati. Il sistema, infine, rende accessibili tutti i dati raccolti via rete rendendo possibile, da qualunque punto di accesso ad Internet, il controllo di edifici situati ovunque ed essendo un sistema digitale presenta un'elevata insensibilità ai disturbi elettromagnetici.

L'occasione per un significativo campo di prova del sistema di monitoraggio è nata a seguito di una collaborazione tra l'Università di Bologna la Columbia University di New York sui problemi a fatica del “Manhattan Bridge”, assieme al più famoso ponte di Brooklyn uno dei principali ponti della “City”. Lo scopo del monitoraggio (a breve termine) del ponte è la verifica a fatica degli elementi di controventamento dell'impalcato, prevedendone la vita utile e per potere svolgere controlli specifici nell'ottica di una ottimizzazione delle risorse. Per raggiungere questo scopo, il primo passo necessario è mettere a punto un modello globale del ponte la cui comportamento sia più prossimo possibile al comportamento della struttura al vero; la determinazione delle caratteristiche modali e meccaniche è effettuata con analisi a partire dalle registrazioni ottenute dal sistema di monitoraggio. Data la complessità del progetto e la molteplicità delle competenze necessarie, è stato richiesto un elevato livello di sinergia tra ricercatori di aree diverse ed anche il supporto di strutture industriali. I principali ruoli sono stati svolti da:

- Marco Savoia (Direttore C.I.R.I Edilizia e Costruzioni): Promozione della collaborazione. Coordinamento prove di laboratorio presso il C.I.R.I. Edilizia e Costruzioni. Organizzazione della campagna di misure sul Manhattan Bridge in collaborazione con la Columbia University.
- Roberto Guidorzi (Cattedra di Teoria dei Sistemi): Progettazione e sviluppo del primo prototipo. Algoritmi di filtraggio e identificazione. Individuazione del partner industriale. Coordinamento generale del sistema.
- Loris Vincenzi (Ricercatore, Università di Modena e Reggio Emilia): Prove sperimentali su edifici e in laboratorio. Analisi dei dati e dei modelli. Prove sul Manhattan Bridge.
- Teleco S.p.a. (azienda leader in Europa in un settore delle comunicazioni su mezzi mobili - Lugo di Romagna): sviluppo della architettura del bus del sistema e del software di trasmissione dei dati. Ingegnerizzazione e produzione del sistema SHM602.
- R. Betti, B. Yanev e R. Testa (docenti della Columbia University, New York), per le informazioni preliminari ed i dati sul ponte, la logistica, il coordinamento dei permessi e supporto di laboratorio.

L'elenco precedente non è esaustivo. Hanno partecipato al progetto anche il presidente della Teleco, Vittorio Simioli, l'ing. Thomas Baravelli (Teleco), il dott. Roberto Diversi (Unibo), il prof. Claudio Mazzotti (Unibo) oltre a vari collaboratori (Serena Vinciguerra, Ilaria Mantoan, Elisa Galli) che hanno operato sia a Bologna che a New York.

Nel seguito vengono descritte le prove effettuate sul Manhattan Bridge di New York, con riferimento alla strumentazione, al layout di prova con la descrizione del posizionamento degli strumenti, ed i risultati preliminari ottenuti per quanto riguarda le caratteristiche modali della struttura.

2 IL SISTEMA DI MONITORAGGIO

Il sistema di monitoraggio innovativo è un prototipo del sistema SHM602 prodotto dalla Teleco S.p.A. congiuntamente alle Università di Bologna e Modena e Reggio Emilia. Tale sistema è stato progettato in accordo con le raccomandazioni riportate in [FIB 2002, ISO 2002]. È composto da una unità centrale (Figura 1a), che ha il compito di gestire il processo di acquisizione, di sincronizzazione delle unità accelerometriche e di archiviazione dei dati, e da unità periferiche intelligenti (Figura 1b) dedicate alla misura, connesse all'unità centrale per mezzo di un bus seriale. Ogni unità periferica misura le accelerazioni della struttura secondo due assi ortogonali grazie alla presenza di un sensore MEMS di alta precisione, oltre alla temperatura dell'ambiente in cui la periferica si trova. Le informazioni sono restituite all'unità centrale con una frequenza di campionamento che può essere scelta dall'utente fino ad un massimo di 80 Hz. Tale frequenza massima è stata scelta considerando l'intervallo tipico delle frequenze di vibrazione principali delle strutture civili.

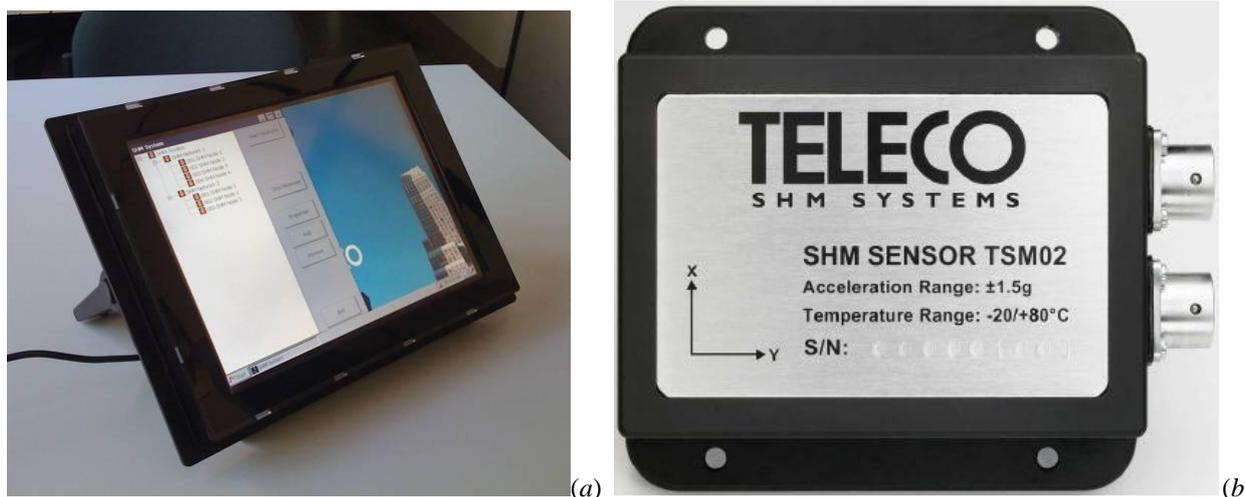


Figura 1. Sistema di monitoraggio composta da (a) unità centrale e (b) unità accelerometriche.

Nel dettaglio, le unità periferiche presentano al loro interno un dispositivo elettronico integrato che funge da supporto per il sensore MEMS, quest'ultimo in grado di acquisire accelerazioni secondo due assi ortogonali, e da un microprocessore che è in grado di elaborare il segnale proveniente dal sensore, prima dell'invio dei dati al sistema centrale. Le unità periferiche sono state studiate in modo da limitare fortemente i costi ma, al tempo stesso, non compromettere un buon rapporto segnale/rumore del segnale acquisito. È noto infatti che, rispetto ai tradizionali accelerometri piezoelettrici, i sensori MEMS sono caratterizzati da un costo inferiore ma solitamente presentano un livello di rumore più elevato. Per tale motivo, i dati acquisiti dal sensore MEMS vengono processati mediante tecniche di elaborazione del segnale direttamente su ogni unità di acquisizione. Tali tecniche sono state accuratamente studiate ed implementate in modo da ottimizzare la qualità del dato acquisito senza avere la necessità di microprocessori con elevate capacità e quindi limitando i costi. Inoltre, il microprocessore presente all'interno dell'unità periferica è in grado, contemporaneamente alla procedura di filtraggio del segnale, di effettuare un processo di identificazione mediante modelli Autoregressivi (AR) [Guidorzi 2003], con complessità crescente fino ad un ordine selezionato dall'utente. Come mostrato infatti in [Sohn e Farrar 2001], l'identificazione di eventuali danni strutturali può essere effettuata confrontando i valori dei coefficienti autoregressivi di modelli AR. Inoltre, le informazioni acquisite possono essere inviate all'unità centrale in modo più compatto ed efficiente.

Per quanto riguarda la frequenza di campionamento, le frequenze proprie significative delle strutture sono in genere nel range 0.1 – 20 Hz. Una maggiore frequenza di acquisizione è necessaria per migliorare il rapporto segnale-rumore ma rende più complesso il processo di sincronizzazione

delle unità collegate e, soprattutto, genera quantità significative di dati che devono essere gestiti, esaminati, trasmessi e archiviati. Questo problema risulta essere particolarmente importante per i sistemi di monitoraggio a lungo termine, caratterizzati dalla necessità di gestire enormi quantità di dati. Il processo di filtraggio del segnale, presente su ogni unità periferica, permette di limitare la frequenza di acquisizione ed evitare un esubero di dati. Con queste procedure, la deviazione standard del rumore presente nelle misure è compresa tra 0.30 e 0.60 mg per acquisizione con frequenza di campionamento tra 20 e 80 Hz mentre l'accelerazione massima misurabile è pari a ± 1.5 g. Il sensore di temperatura, integrato in ogni unità, è in grado di restituire la temperatura dell'ambiente in cui opera l'unità con range di funzionamento pari a $-20^{\circ}\text{C} \div + 80^{\circ}\text{C}$ e una precisione di $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$.

L'unità centrale (Figura 1a) è un computer con schermo 10" touch screen incorporato, dedicato alla gestione del processo di monitoraggio. Su questa unità, caratterizzata da un sistema operativo Windows proprio, è stato implementato un software specifico di gestione, controllo e archiviazione dei dati provenienti dalle unità di acquisizione periferica. Il software ha il compito di sincronizzare temporalmente tutte le unità collegate ad un intervallo temporale definito dall'utente. La sincronizzazione delle informazioni acquisite e la precisione di questo processo è indispensabile per ottenere risultati accurati nel processo di identificazione.

Il software permette all'utente di selezionare i parametri principali di acquisizione quali la frequenza di acquisizione, il numero dei canali da acquisire, l'ordine di complessità dei modelli autoregressivi per ogni unità periferica, la destinazione su cui eseguire l'archiviazione dei dati. Quest'ultima può essere effettuata sia sulla memoria interna all'unità centrale sia su unità esterne collegabili mediante bus USB oppure, infine, su una unità di archiviazione remota grazie alla presenza di una scheda ethernet. L'unità centrale è in grado di restituire visivamente le informazioni acquisite dalle unità periferiche, effettuando una prima elaborazione dei dati. È possibile visualizzare, ad intervalli prefissati, i risultati del processo di identificazione quali le frequenze proprie della struttura, la funzione densità di potenza spettrale (PSD) del segnale per ogni canale acquisito, i poli identificati rappresentati nel cerchio unitario (si veda [Guidorzi, 2003]).

L'unità centrale, ad istanti temporali successivi, interroga le unità periferiche richiedendo l'invio di pacchetti di dati in formato digitale tramite bus seriali, ognuno dei quali può connettere fino a 16 unità. Attraverso il bus, i dati raccolti dalle unità periferiche (accelerazioni, temperatura, parametri dei modelli autoregressivi) sono inviati all'unità centrale; inoltre, il bus digitale permette l'invio delle impostazioni scelte dall'utente dall'unità di controllo alle unità di acquisizione; fornisce, infine, l'alimentazione necessaria ai singoli componenti del sistema.

Oltre a quanto detto, l'utilizzo di un bus sul quale corrono informazioni digitali presenta enormi vantaggi nella riduzione del rumore delle misure. Infatti, nei sistemi di monitoraggio tradizionali con segnali analogici, vi è sovente un elevato rumore addizionale dovuto alla presenza di disturbi nei cavi, soprattutto quando questi sono di lunghezza significativa (caso comune nei monitoraggi di edifici caratterizzati da dimensioni importanti). Il bus è collegato alle unità periferiche mediante un connettore schermato tipo IP67, in grado di assicurare il corretto funzionamento anche in applicazioni esterne con condizioni ambientali non favorevoli.

L'SHM602 è un infine sistema modulare, in cui possono essere integrati anche da unità di acquisizione di dati analogici che consente il collegamento di una gamma molto vasta di sensori addizionali (estensimetri, celle di carico, trasduttori di spostamenti ecc.).

Grazie all'elevato rapporto segnale-rumore, soprattutto per le basse frequenze, il sistema Teleco SHM rappresenta uno strumento appropriato per il monitoraggio di strutture flessibili quali ponti di grande luce, torri o alti edifici. Grazie alla sua adattabilità, può essere efficacemente utilizzato anche in strutture più rigide quali edifici storici e ponti ordinari.

3 LE PROVE DINAMICHE SUL MANHATTAN BRIDGE

Il sistema Teleco SHM602, descritto nel capitolo 2, è stato utilizzato per una campagna di monitoraggio del “Manhattan Bridge” (Figura 2). Il Manhattan bridge è uno dei ponti principali della città di New York. Realizzato nel 1909 secondo il progetto di Leon Moisseiff, il Manhattan bridge collega la zona sud di Manhattan con il quartiere di Brooklyn, permettendo il passaggio ogni giorno di 75000 veicoli, 320000 mezzi per il trasporto merci e 4 linee di metropolitana. È un ponte sospeso, con campata centrale di oltre 448 metri e campate laterali di 221 m, con cavi di 55 cm di diametro che sorreggono un impalcato metallico. L’impalcato è formato da reticolari metalliche, le principali alte circa 6 metri, con una geometria tipo Warren. Gli elementi delle reticolari sono composti da profili composti calastrellati, connessi tra loro mediante chiodatura. Le due torri principali sono alte oltre 102 metri, anch’esse composte da elementi metallici di significativo spessore, ma che le rendono significativamente deformabili.



Figura 2. Il Manhattan Bridge di New York.

Sin dalla sua apertura, il ponte ha visto un anomalo e veloce deterioramento degli elementi di controvento orizzontale, dovuto principalmente alla torsione indotta dal transito dei treni metropolitani. La significativa flessibilità del ponte e la forma della sezione trasversale, associato all’insufficiente sistema di controvento di piano, ha contribuito alla crisi per fatica di numerosi collegamenti rivettati, sia a causa dell’elevato stato tensionale, sia a causa di vibrazioni locali e distorsioni indotte dal passaggio della metropolitana. Dal 1909 si sono susseguite numerose campagne di ripristino e di rafforzamento dell’impalcato, l’ultima delle quali è iniziata nel 1982 ed è tutt’oggi ancora in corso.

3.1 Descrizione del layout di prova

Il sistema di monitoraggio è composto da 14 unità accelerometriche biassiali basati su tecnologia MEMS; i sensori sono stati posizionati in diverse configurazioni (Figura 3), in modo tale da potere cogliere il numero maggiore possibile di modi e poter definire le forme modali con elevata accuratezza. I 14 sensori sono posizionati in corrispondenza delle due corsie dedicate al traffico pedonale e ciclabile, poste sui due lati opposti del ponte. Nella definizione del set-up di prova si sono dovute seguire alcune condizioni talvolta stringenti, tra cui l’impossibilità di interrompere, anche solo temporaneamente, il traffico veicolare e metropolitano. È stato quindi scelto acquisire le registrazioni dei 28 accelerometri da due unità centrali differenti, poste ciascuna su un lato del ponte. La sincronizzazione dei dati è stata possibile a posteriori, grazie al sistema di riferimento assoluto del tempo comune alle due unità. Inoltre, solo gli elementi strutturali accessibili dalle passerelle laterali potevano essere utilizzate per la locazione dei sensori. Per motivi di sicurezza, non è stato quindi possibile posizionare strumenti all’estremità superiore delle pile.

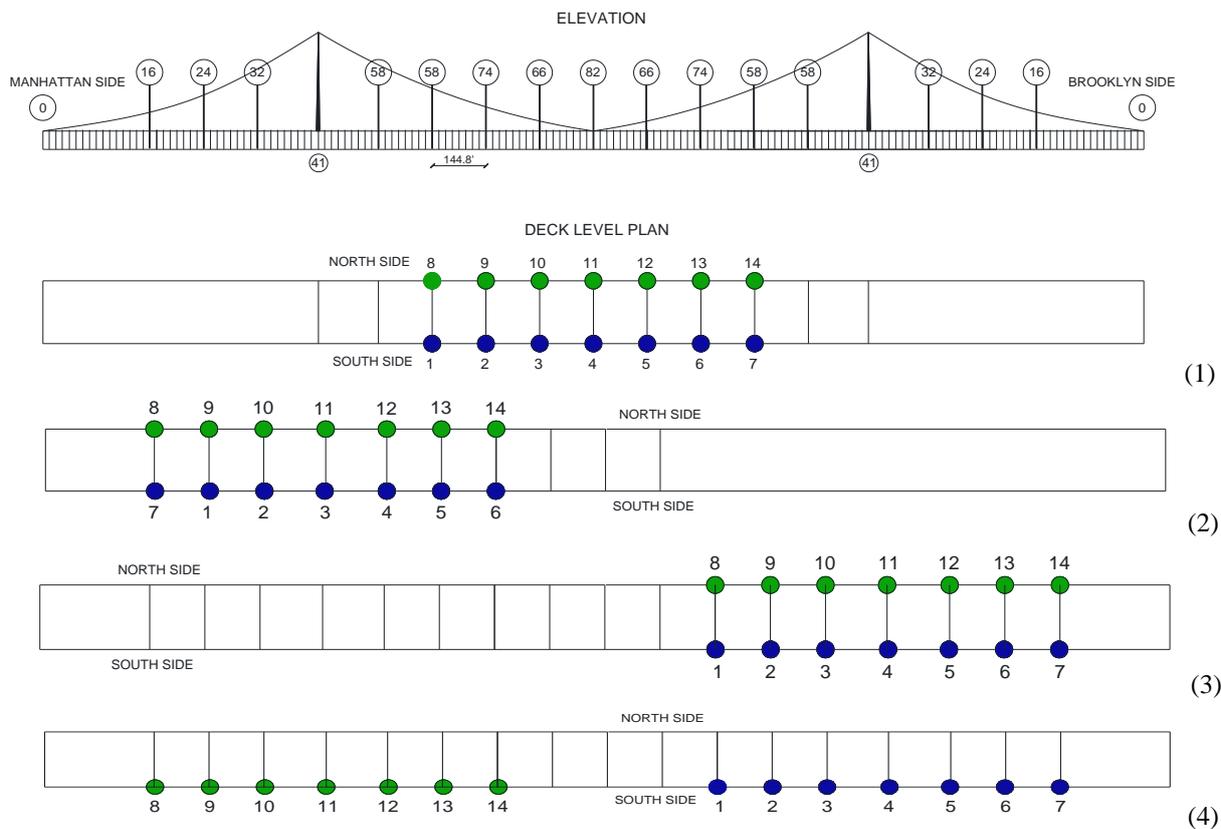


Figura 2. Configurazioni di prova – vista in prospettiva (a) e piante (1-4).

Infine, dati i ristretti tempi che sono stati concessi dalle autorità di sicurezza, è stato possibile acquisire solo i dati di 2 giorni di misura. Il risultato è consistito quindi nella definizione di 4 diverse configurazioni, in modo da definire 34 punti di misura dai quali ricavare le deformate modali con le corrispettive frequenze proprie. Nei 34 punti di misura, distanti approssimativamente 45 metri l'uno dall'altro e in corrispondenza dei montanti delle travate reticolari esterne (Figura 4), sono state registrate accelerazioni sia verticali che orizzontali, queste ultime principalmente in direzione ortogonale all'asse del ponte; solo in corrispondenza delle pile, gli strumenti sono stati posti per registrare anche misure longitudinali. La configurazione "1" è stata studiata per cogliere principalmente i modi della campata centrale; le configurazioni "2" e "3", pur mantenendo alcune posizioni di strumenti comuni alla "1", si concentrano principalmente sulle campate laterali, in modo da valutare i modi con spostamenti relativi tra la campata centrale e laterali; la configurazione "4" ha lo scopo di riassumere i modi del ponte visti da un unico lato. Le accelerazioni strutturali sono state acquisite con una frequenza di campionamento pari a 20 Hz.



Figura 3. Esempio di strumento posizionato su un montante del ponte.

4 IDENTIFICAZIONE MEDIANTE ALGORITMI NEL DOMINIO DELLE FREQUENZE

Gli algoritmi nel dominio delle frequenze prevedono l'acquisizione di accelerazioni dalle prove sperimentali e permettono di ricavare informazioni sul comportamento dinamico di una struttura, in termini di frequenze proprie ω_r , smorzamenti modali ξ_r , e forme modali ϕ_r . Vi sono numerosi metodi che consentono di identificare i modi propri nel dominio delle frequenze, i quali, pur utilizzando procedure molto diverse, si basano sulla elaborazione dei dati espressi in forma di funzioni di risposta in frequenza (FRF) o funzioni di densità spettrale di potenza (PSD) [Bendat e Piersol, 1983].

Il metodo più semplice per la determinazione delle caratteristiche modali delle strutture nel dominio delle frequenze è il metodo *Peak-Picking (PP)*. Il metodo prende nome dall'assunzione che le frequenze proprie corrispondono ai picchi del modulo della *FRF*. Data la sua semplicità, nel passato questo metodo è stato il più diffuso per la determinazione delle caratteristiche modali di strutture civili [Ewins, 2000]. Il metodo assume che lo smorzamento sia modesto e che i modi siano ben distinti tra loro. Nel caso in cui questo non accada, l'applicazione del metodo porta a commettere errori significativi. Infatti, il metodo identifica le *operating deflection shapes* invece dei modi propri, le quali sono combinazioni lineari dei diversi modi propri della struttura. Tecniche basate sulla decomposizione modale come, ad esempio, la *Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD)* [Brincker et al, 2000, Rainieri, 2008] superano questo limite. Infatti, la metodologia EFDD consiste nel definire la matrice di densità spettrale di potenza del segnale acquisito e di introdurre una decomposizione ai valori singolari (*Singular Value Decomposition, SVD*) allo scopo di separare il contributo dei singoli modi. Come suggerisce il nome, l'EFDD è stato sviluppato originariamente per individuare e distinguere i modi presenti nelle misure effettuate [Allemang & Brown, 1998]. Il metodo è caratterizzato da una procedura di diagonalizzazione della matrice di densità spettrale tramite la tecnica *SVD*, in modo da separare i modi accoppiati e ottenere da un sistema a N gradi di libertà (*GDL*), N sistemi ognuno ad un singolo grado di libertà. Una volta disaccoppiati i contributi dei singoli modi, è possibile applicare tecniche classiche di identificazione, quali il *Peak-Picking (PP)* [Ewins, 2000]. Procedure definite da altri autori [Maia et al., 1997] permettono di sostituire al *PP* metodi più evoluti per la determinazione delle caratteristiche modali, una volta ottenuta la decomposizione della matrice spettrale in singoli gradi di libertà.

4.1 Identificazione mediante il metodo "Enhanced Frequency Domain Decomposition"

I vantaggi di del metodo EFDD sono principalmente la rapidità e l'affidabilità del metodo e la risposta può essere misurata anche durante il normale funzionamento della struttura [Rainieri, 2008], se propriamente eccitata. Inoltre l'approccio EFDD presenta considerevoli aspetti in quanto:

- la *SVD* rappresenta un metodo efficace per regolarizzare la matrice spettrale e quindi migliorare la stima delle deformate modali;
- la valutazione delle forme modali è automatica e significativamente più semplice;
- modi con frequenze ravvicinate possono identificarsi in base ai vettori singolari corrispondenti ai successivi valori singolari non trascurabili;
- consente anche una buona stima degli smorzamenti modali, stima particolarmente critica con metodi meno raffinati.

Alcuni dettagli della metodologia esse trovate nel seguito; per le basi teoriche e numerose applicazioni del metodo si faccia riferimento a [Andersen et al. 1999, Brincker et al., 2000, Brincker et al., 2001, Rainieri 2008, Vincenzi e Mazzotti 2009].

4.2 L'algoritmo di identificazione

L'algoritmo di identificazione viene brevemente descritto. Si suddividono le time history misurate in più serie di assegnata lunghezza, selezionate con una adeguata percentuale di sovrapposizione (*windowing*). Ciascuna delle serie viene inizialmente trattata mediante tecniche di

filtraggio del segnale in modo da risultare centrata sul valore medio nullo e riducendo il campo di interesse ad un determinato range di frequenze, Ricavate le funzioni di densità spettrali di potenza proprie e incrociate (Autospettro e Cross-spettro) attraverso una procedura basata sulle trasformate di Fourier delle serie, si compie la decomposizione modale (*Singular Values Decomposition SVD*). Tale decomposizione conduce alla determinazione della matrice diagonale che ha sulla diagonale principale i valori singolari e in una matrice di vettori U che verrà utilizzata per la definizione delle forme modali.

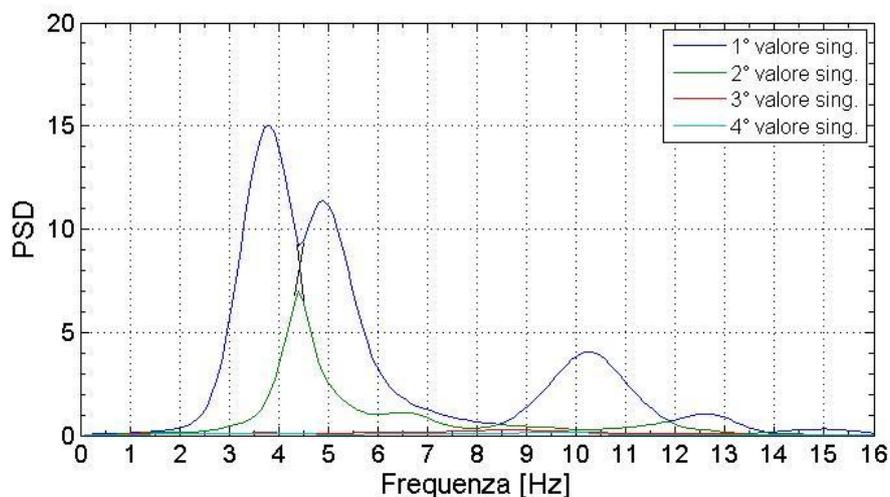


Figura 4. Esempio di strumento decomposizione della funzione di potenza (PSD).

Se si rappresentano i valori singolari in funzione della frequenza, si ottiene un grafico come quello descritto in Figura 5. Ogni picco delle curve così ottenuto rappresenta un modo di vibrare, il cui contributo è stato separato dagli altri modi. Il grafico contiene, in forma condensata, tutte le informazioni relative a tutti gli strumenti di misura presenti nella prova in funzione della frequenza. Le frequenze proprie si potranno quindi identificare su questo grafico tramite la procedura di ricerca del picco, riuscendo a distinguere anche modi anche molti prossimi tra di loro in termini di frequenza. Per ogni picco (modo proprio) che si voglia identificare, la procedura prevede di definire il valore di picco (corrispondente alla frequenza propria), la deformata modale, la campana associata al modo e lo smorzamento modale. L'identificazione della campana spettrale rappresentante il sistema ad un singolo grado di libertà corrispondente ogni picco è ottenuta tramite il MAC (Modal Assurance Criterion) [Ewins 2000]. Affinché i vettori singolari per frequenze prossime a quella del picco appartengano alla decomposizione della funzione di potenza della risposta del modo preso in esame, è necessario che il MAC ottenuto confrontando i vettori singolari appena citati con la forma modale stimata, assuma un valore maggiore di un limite stabilito, solitamente posto pari a 0.90 [Andersen, 1999].

Data la campana spettrale, una stima più accurata della deformata modale può essere quindi effettuata tramite una media pesata di tutti i vettori della matrice \mathbf{u} appartenenti alla campana selezionata, moltiplicandoli per i rispettivi valori singolari in modo tale da dare più peso ai vettori più vicini al picco. Selezionate le frequenze attorno al picco con tale criterio, è possibile applicare la *trasformata inversa di Fourier* IDFT per ottenere il segnale nel dominio del tempo \mathbf{y} . Lo smorzamento è quindi calcolato mediante il decremento logaritmico, che consente di determinare in maniera approssimata il rapporto di smorzamento ξ misurando sperimentalmente i massimi di due ampiezze successive. Infine, una conferma della frequenza propria viene infine effettuata dall'analisi del segnale nel dominio del tempo, valutando la distanza dei punti di massimo della sinusoide ottenuta.

5 RISULTATI PRELIMINARI: PRINCIPALI CARATTERISTICHE MODALI DELLA STRUTTURA

Nel seguito vengono presentati alcuni risultati preliminari.

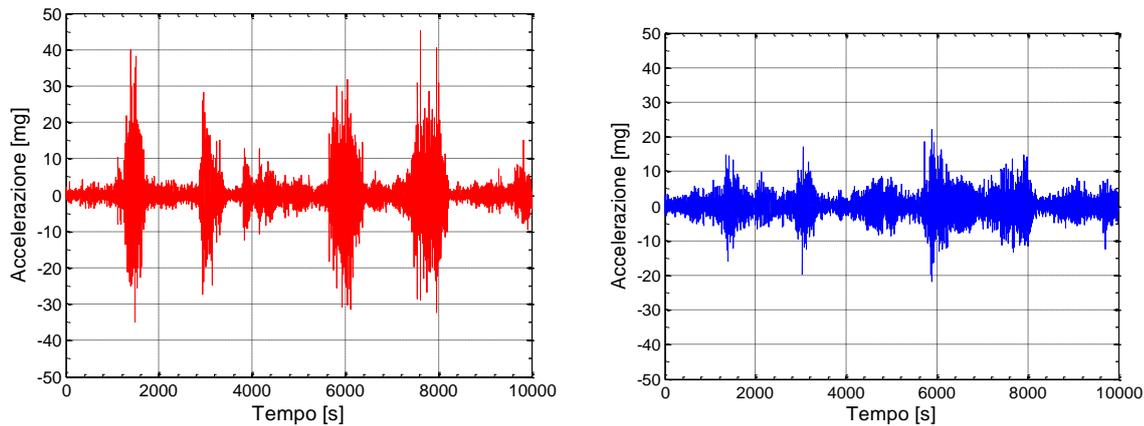


Figura 5. Esempi di accelerazioni misurate: (a) verticali e (b) orizzontali.

In figura 6 sono riportati un esempio di andamento delle accelerazioni verticali (a) e orizzontali (b) durante il normale esercizio del ponte. Si notano accelerazioni massime dell'ordine di 40-50 mg e 20-25 mg, rispettivamente. In figura 7 sono riportate due immagini con lo spettro di potenza (PSD) attribuite a due finestre temporali in cui il ponte era eccitato dal traffico veicolare e dal vento (non sono presenti cioè vibrazioni indotte dal passaggio di treni metropolitani). Si possono notare i picchi della PSD, corrispondenti ai modi propri successivamente identificati.

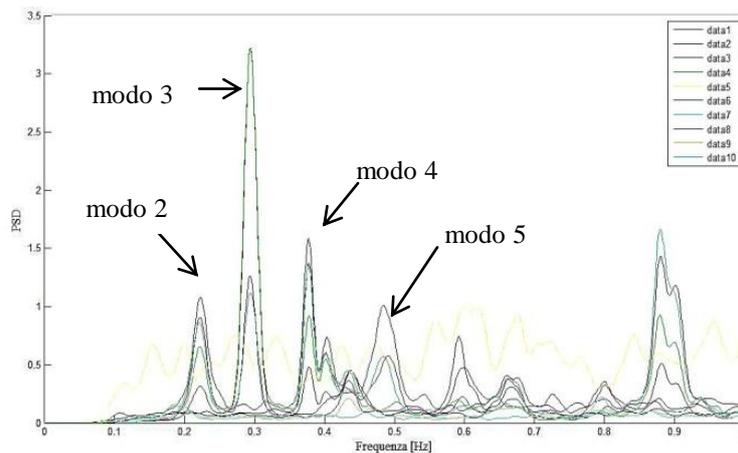


Figura 6. Esempio di PSD in condizioni di esercizio

In tabella 1 vengono riportate le frequenze proprie ottenute dall'analisi di diverse finestre temporali in diverse configurazioni. In tabella 2 vengono riportate le frequenze proprie ottenute per i primi 4 modi di vibrare, a confronto con quelle di un modello agli elementi finiti; sono riportate anche figure dei modi di vibrare corrispondenti (dal modello agli elementi finiti) con il valore del MAC. I risultati mostrano numerose frequenze entro 1 Hz, con la prima frequenza propria a circa 0.2 Hz. I valori delle frequenze sono ben correlati con le frequenze del modello agli elementi finiti; è presente inoltre una significativa correlazione anche tra i modi, a parte il 1 che presenta un MAC non oltre il 62%.

Modo	A	B	C	D	E	F	G
1	/	0.192	0.201	0.192	/	0.191	0.202
2	0.224	0.221	0.223	0.224	0.226	0.226	0.226
3	0.295	0.295	0.296	0.296	0.298	0.298	0.298
4	0.403	0.379	0.404	0.404	0.380	0.382	0.382
5	0.439	/	0.438	/	0.438	/	0.438
6	0.489	0.495	0.493	0.493	0.492	0.482	0.492
7	0.595	0.589	0.590	0.593	0.582	0.596	0.582
8	/	/	/	/	0.624	/	0.624
9	0.677	0.675	/	/	0.676	0.674	0.676
10	0.8	0.8	0.772	0.8	/	/	0.786
11	0.879	0.881	0.880	0.880	0.888	0.886	0.906

Tabella 1. Frequenze proprie [Hz] ottenute da diverse finestre temporali e per diverse configurazioni.

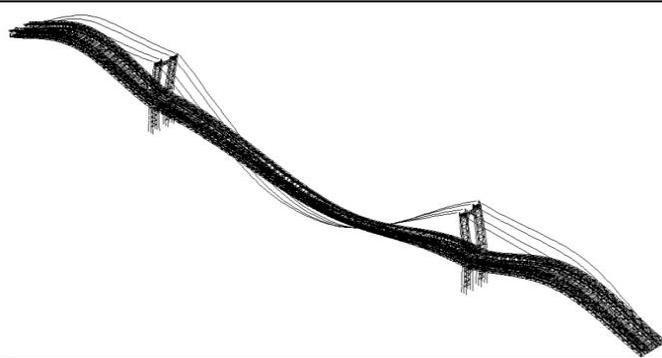
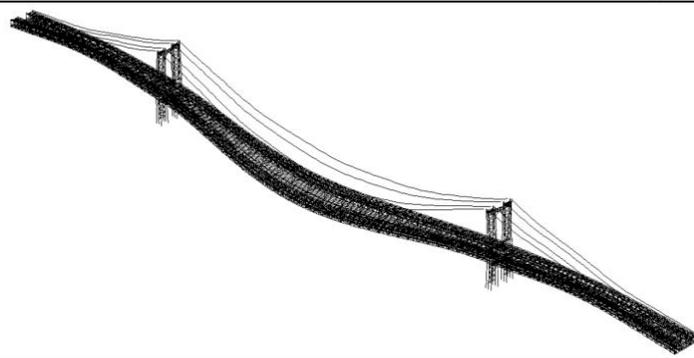
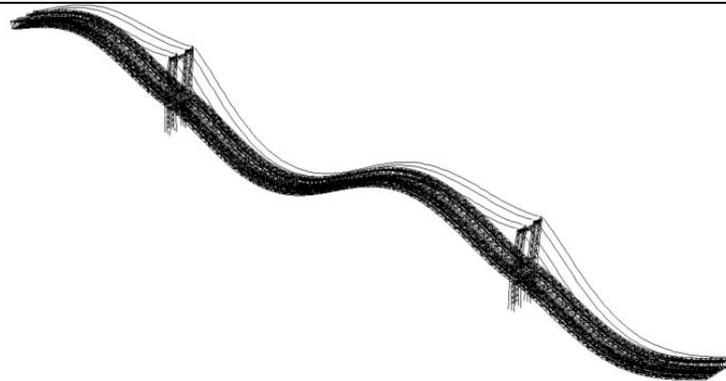
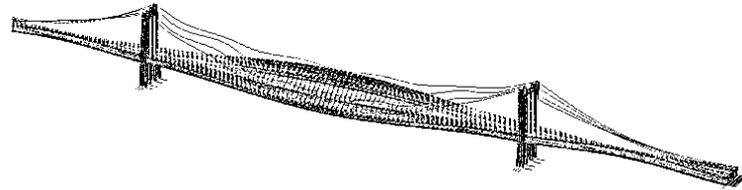
MODO		FREQ SPER (EFDD)	FREQ SPER (EFDD)	CONFR. (MAC)
Modo 1: Laterale		0.213	0.213	0.62
Modo 2: Flessio-torsionale		0.225	0.225	0.99
Modo 3: Flessionale		0.297	0.297	0.97
Modo 4: Torsionale		0.380	0.380	0.98

Tabella 2. Frequenze proprie [Hz] ottenute da diverse finestre temporali e per diverse configurazioni

BIBLIOGRAFIA

- Allemang, R.J. & Brown, D-L. 1998. A unified matrix polynomial approach to modal identification. *Journal of sound and Vibration*, 211(3), 301-322.
- Andersen, P., Brincker, R., Peeters, B., De Roeck, G., Hermans, L., Krämer, C., 1999. Comparison of system identification methods using ambient bridge test data , 17th International Modal Analysis Conference (IMAC), Kissimmee, Florida, USA.
- Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P., 2000. Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition, Atti del 18° congresso SEM - International Modal Analysis Conference, San Antonio, USA.
- Brincker, R., Ventura, C., Andersen, P., 2001. Damping estimation by Frequency Domain Decomposition, Atti del convegno IMAC XIX, Kissimmee, USA.
- Bedant, J.S., Piersol, A.G., 1986. Engineering application of correlation and spectral analysis. John Wiley & sons, New York, USA.
- Ewins, D.J., 2000. Modal testing: theory and practice. John Wiley & sons, New York, USA.
- FIB Task Group 5.1, 2002. *Monitoring and Safety Evaluation of Existing Concrete Structures*, State-of-the-Art Report, Final draft.
- Guidorzi, R., 2003. *Multivariable System Identification: from observations to models*. Bononia University Press, Bologna.
- Guidorzi R., Diversi R., Vincenzi L., Mazzotti C., Simioli V. 2011. Structural monitoring of the Tower of the Faculty of Engineering in Bologna using MEMS-based sensing. EuroDyn 2011, Leuven, Belgio.
- ISO/DIS 18649:2002(E), 2002. Mechanical vibration – Evaluation of measurement results from dynamic tests and investigations on bridges.
- Maia, N.M.M., Silva J.M.M. & He J. 1997. Theoretical and experimental modal analysis. Somerset, England: Research Studies Press.
- Rainieri C., Fabbrocino G. Verderame G.M., Cosenza E., 2008. Modal analysis of the Tower of the Nations in Naples, *Atti del XIV World Conference on Earthquake Engineering*, Pechino, China.
- Sohn, H., Farrar, C. R., 2001. Damage Diagnosis Using Time Series Analysis of Vibration Signals, *Smart Materials and Structures*, 10(3), 446-451.
- Teleco SHM Systems site: www.telecoshmsystems.com
- Vincenzi L., Mazzotti C. (2009). Identificazione dinamica di una passerella pedonale strallata mediante algoritmi nel dominio delle frequenze, XIII Convegno Nazionale di Ingegneria Sismica ANIDIS, 28 giugno – 2 luglio, Bologna.