



La salvaguardia dei beni culturali dai rischi naturali e antropici

Le strutture storiche sono state costruite senza tener conto delle azioni orizzontali risultando molto vulnerabili alle azioni sismiche e alle vibrazioni indotte dal traffico. Il rilievo di vibrazioni ambientali e forzate consente di valutare il comportamento dinamico di una struttura monumentale e di tarare un modello matematico, indispensabile per stimarne lo stato di salute e definire eventuali interventi. Sin dagli anni '80 l'ENEA ha eseguito rilievi di vibrazioni su diversi monumenti tra cui l'Obelisco Flaminio, il Colosseo, l'Arco di Costantino, il Duomo di Orvieto e la Villa dei Misteri di Pompei.

DOI 10.12910/EAI2022-028

di Paolo Clemente, Laboratorio di Analisi e protezione delle infrastrutture critiche - ENEA

La storia insegna che molti monumenti sono stati distrutti da eventi naturali e i terremoti rappresentano la più comune

causa di collasso. D'altra parte, l'invecchiamento naturale dei materiali, l'erosione dovuta al vento, alla pioggia e all'inquinamento e agli effetti delle

escursioni termiche, possono determinare un continuo deterioramento delle superfici esposte con una significativa riduzione della resistenza

dei materiali e, quindi, della capacità strutturale. Questo processo può essere accelerato dagli effetti delle vibrazioni indotte dal traffico, col risultato di incrementare la vulnerabilità alle azioni statiche e dinamiche o, perfino, favorire un crollo improvviso in caso di sisma.

In molti casi, le strutture storiche sono state costruite senza tener conto delle azioni orizzontali e, pertanto, sono molto vulnerabili alle azioni sismiche e alle vibrazioni indotte dal traffico, queste ultime diventate importanti soltanto nella seconda metà del ventesimo secolo. Va ricordato che il comportamento di una struttura storica è alquanto complesso a causa di diversi fattori, tra cui la scarsa conoscenza dell'effettiva geometria e delle caratteristiche dei materiali, nonché delle condizioni di vincolo interne e esterne. Pertanto, i modelli strutturali necessitano di opportune validazioni sperimentali che possono essere perseguite mediante prove dinamiche e, a tal fine, le vibrazioni indotte dal traffico rappresentano una sollecitazione continua, disponibile a costo zero.

Le problematiche evidenziate sono amplificate per siti e strutture archeologiche, a causa dei danni legati agli eventi passati e, in alcuni casi, all'assenza di un'adeguata manutenzione. L'importanza storica di questi siti impone un impegno per la loro conservazione. Sono, infatti, attrazioni per i turisti, con significativi ritorni economici, e quindi necessitano di un adeguato controllo e manutenzione al fine di garantirne la conservazione unitamente ad un accettabile grado di sicurezza.

Le potenzialità dell'analisi sperimentale vibrazionale

Le potenzialità dell'analisi sperimentale vibrazionale erano state intuite dai ricercatori dell'ENEA sin dagli anni '80 dello scorso secolo, quando organizzarono un importante progetto che prevedeva campagne di rilievi di vibra-



Fig. 1 La parete nord vista dall'interno

zioni su diversi monumenti di Roma, tra cui le Colonne Coclidi, l'Obelisco Flaminio, il Colosseo, l'Arco di Costantino, il Tempio di Minerva Medica e altri. Ciascuna struttura fu strumentata con una rete di velocimetri. I rilievi di vibrazioni furono eseguiti in diverse condizioni di traffico e i dati furono analizzati nel dominio del tempo e della frequenza, evidenziando i valori massimi delle vibrazioni e le caratteristiche dinamiche delle strutture. Alcuni di essi, come le Colonne Coclidi e il Colosseo, sono stati oggetto di ulteriori e anche recenti campagne sperimentali. Negli anni successivi, lo studio delle vibrazioni ambientali e indotte dal traffico ha riguardato altre strutture monumentali. Tra queste:

- Villa Farnesina, protetta da una pavimentazione antivibrante posta al di sotto della pavimentazione stradale del vicino Lungotevere; lo studio ha permesso di verificare il corretto funzionamento della pavimentazione, realizzata nel 1971 su progetto di Gustavo Colonnetti;
- il Tempio Rotondo al Foro Boario, per il quale la Soprintendenza Archeologica di Roma aveva avviato un programma di lavori per il consolidamento strutturale;
- il Duomo di Orvieto, dove per effetto del sisma del 1997 si erano aperte alcune preoccupanti lesioni nella volta della Cappella del Corporale;
- l'Obelisco Lateranense, oggetto di un approfondito studio sui materiali, mediante prove soniche, e sulla struttura, mediante rilievo di vibrazioni ambientali e indotte dal traffico.

Vibrazioni dovute a terremoti reali sono state, invece, registrate sul campanile medievale della chiesa di S. Giorgio a Trignano, gravemente danneggiato dal terremoto di Reggio Emilia del 15 ottobre 1996 (Ml = 4,8). Una prima caratterizzazione dinamica è stata eseguita subito dopo l'evento sismico; sono stati quindi installati un accelerometro triassiale sul basamento e tre accelerometri orizzontali in sommità per registrare gli effetti delle repliche. In circa due mesi sono stati registrati sessantasette terremoti di bassa magnitudo; l'analisi dei dati ha evidenziato importanti cambiamenti delle frequenze di risonanza e dello smorzamento in funzione dell'energia trasmessa al piede della torre. Il campanile è stato infine riparato con miglioramento sismico, utilizzando dispositivi in lega a memoria di forma. Un evento sismico, verificatosi pochi mesi

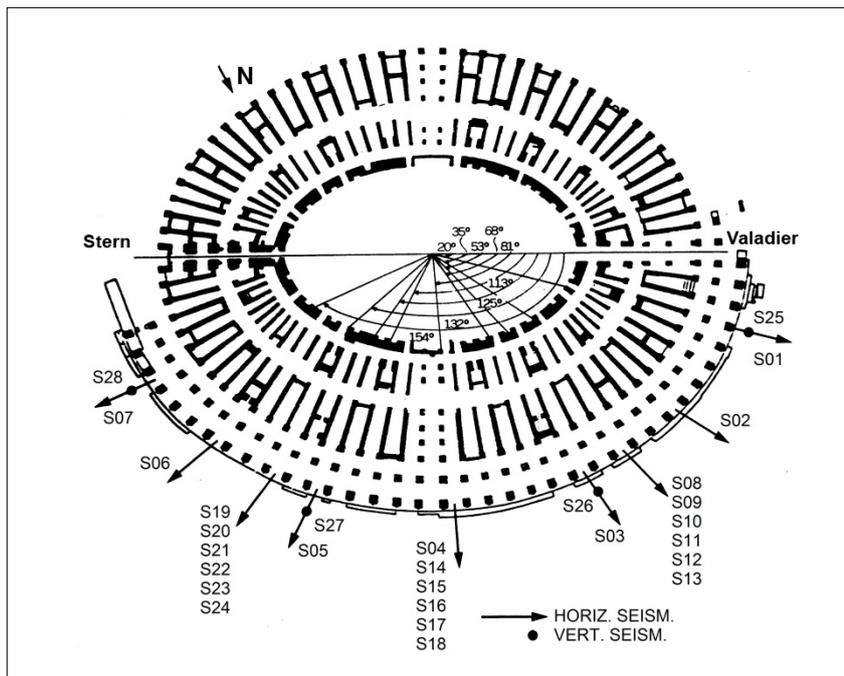


Fig. 2 Posizionamento dei sensori sulla parete del Colosseo.

dopo la fine dei lavori, ha certificato la bontà dell'intervento.

Tra le applicazioni agli edifici storici si ricordano il monitoraggio sismico del Centro di Documentazione e Ricerca Antropologica della Valle Nerina (CEDRAV) di Cerreto di Spoleto, danneggiato dalla sequenza sismica Umbro-Marchigiana del 1997, e del Palazzo Marchesale a San Giuliano di Puglia, dove è stata installata una rete accelerometrica fissa e sono stati registrati alcuni terremoti. Entrambi gli edifici sono irregolari sia in pianta che in elevazione; le registrazioni sismiche hanno permesso di evidenziare alcune caratteristiche del loro comportamento dinamico e della loro vulnerabilità, e di mettere a punto modelli ad elementi finiti piuttosto complessi ma efficaci nell'interpretare il comportamento osservato durante gli eventi.

Per la Villa dei Misteri droni e test diagnostici

Nell'ambito della valutazione dello stato delle coperture di protezione di Villa dei

Misteri, una delle domus più famose dell'antica città di Pompei, è stato condotto uno studio dettagliato attraverso un approccio multidisciplinare. Oltre a test diagnostici in situ e in laboratorio e telerilevamento mediante l'uso di droni per ispezionare aree e coperture non facili da raggiungere in sicurezza, sono state eseguite anche le misurazioni delle vibrazioni ambientali come base per la valutazione della sicurezza sismica, nonché per la caratterizzazione dinamica del suolo e l'analisi degli effetti della trincea che circonda la Villa su tre lati. Tra le applicazioni più recenti, va ricordato il rilievo delle vibrazioni sulla Tor-

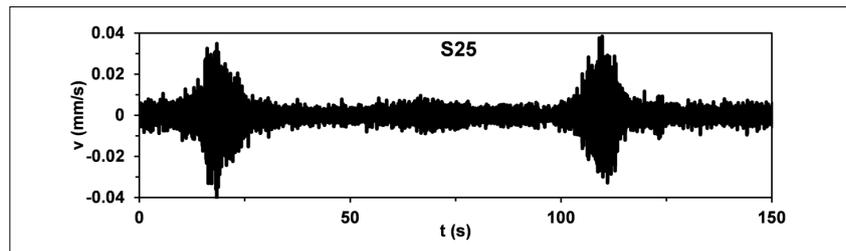


Fig. 3 Registrazione in direzione verticale (S25). Sono evidenti due passaggi della metropolitana.

re della Moletta e le rovine del Circo Massimo a Roma, eseguito nel settembre 2019, prima, durante e dopo il concerto di un famoso gruppo, nell'ambito di un intervento di conservazione di quest'area archeologica. I risultati hanno evidenziato differenze di ampiezza ma anche in termini di contenuto in frequenza delle registrazioni durante il concerto rispetto a prima e dopo, e che il comportamento dinamico del terreno e delle strutture, come prevedibile, è fortemente influenzato dalla presenza di strutture interrato.

La parete nord del Colosseo

Come esempio, si riporta di seguito lo studio eseguito sul Colosseo, sul quale sono state condotte due campagne sperimentali, rispettivamente nel 1985 e nel 2014. La sperimentazione ha riguardato, in particolare, la parete nord (Figura 1) sulla quale sono stati disposti nella prima campagna 13 velocimetri in diverse configurazioni (Figura 2): 7 di essi (S01 - S07) sono stati tenuti sempre in sommità della parete, in direzione radiale, gli altri 6 sono stati disposti in tre diversi allineamenti verticali (S08-S13, S14-S18, S19-S24). L'analisi nel dominio del tempo ha evidenziato vibrazioni di maggiore ampiezza in prossimità dell'estremità ovest della parete, durante i passaggi della metropolitana. L'analisi spettrale ha consentito di ricavare le proprietà dinamiche della parete, ossia le frequenze di risonanza e le forme modali associate. Le prime due riguardano gli speroni, dello Stern e del Valadier ri-



Fig. 3 Posizionamento di una terna di velocimetri.

spettivamente; le successive impegnano l'intera parete. I principali risultati possono essere così riassunti:

- alcune coppie di forme modali sono

all'incirca simmetriche rispetto al centro della parete (S04);

- le ampiezze modali sono sempre molto basse in S04, che quindi è un nodo per tutte le forme modali;
- in corrispondenza dei sensori S11, S16 e S22, rispettivamente per la prima, seconda e terza verticale, è evidente nelle forme modali una variazione della rigidità della parete;
- i valori di vibrazione alla base non sono trascurabili, pertanto l'interazione suolo-struttura dovrebbe essere analizzata in dettaglio;
- gli spostamenti lungo gli allineamenti verticali non sempre aumentano verso l'alto ma le forme modali presentano variazioni nel segno della derivata; questo aspetto è correlato alle irregolarità del collegamento tra il muro esterno e gli altri elementi strutturali;
- alcune frequenze evidenziate da questa analisi potrebbero non essere

associate effettivamente ad una forma modale; ulteriori informazioni potrebbero essere ottenute mediante il confronto con i risultati di un opportuno modello numerico.

L'analisi delle registrazioni di sensori in direzione verticale (S25-S28) ha evidenziato ancora l'influenza dei passaggi del treno metropolitano (Figura 3), che si risentono molto meno man mano che ci si allontana (S26-S28). Con altre configurazioni sono state analizzati i moti dei due speroni e quelli in direzione tangenziale alla parete.

In definitiva, l'analisi delle vibrazioni rappresenta uno strumento di diagnosi per le strutture e, in particolare, per quelle di interesse storico e artistico: misuro come vibri e ti dirò come stai.

Per info: paolo.clemente@enea.it

BIBLIOGRAFIA

1. Bergamasco I., Carpani B., Clemente P., Papaccio V. (2012). "Seismic preservation of archeological sites: the case of Pompeii". In Jasienko J. (ed), *Structural Analysis of Historical Constructions*, 2: 1386-1394.
2. Bongiovanni G., Buffarini G., Clemente P., Rinaldis D., Saitta F. (2017). "Dynamic characteristics of the Amphitheatrum Flavium northern wall from traffic-induced vibrations". *Annals of Geophysics*, 60(4): S0439.
3. Bongiovanni G., Buffarini G., Clemente P., Rinaldis D., Saitta F. (2017). "Experimental vibration analyses of a historic tower structure". *J. Civil Structural Health Monitoring*, 7(5): 601-613.
4. Bongiovanni G., Buffarini G., Clemente P., Saitta F. (2021). "Time and Frequency Domain Analyses in the Experimental Dynamic Behaviour of the Marcus Aurelius' Column". *Int. J. of Architectural Heritage*, 15(1): 64-78.
5. Bongiovanni G., Celebi M., Clemente P. (1990). "The Flaminio Obelisk in Rome: vibrational characteristics as part of preservation efforts". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 19(1): 107-118.
6. Buffarini G., Clemente P., Paciello A., Rinaldis D. (2008). "Vibration Analysis of the Lateran Obelisk". *Proc. of the 14th WCEE*, Paper S11-055.
7. Clemente P., Rinaldis D. (1998). "Protection of a monumental building against traffic-induced vibrations". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 17(5): 289-296.
8. Clemente P., Rinaldis D., Bongiovanni G. (1994). "Dynamic characterization of the 'Tempio della Minerva Medica'". *Proc. of the 10ECEE*, 2: 981-986, Balkema.
9. Clemente P., Rinaldis D., Buffarini G. (2007). "Experimental seismic analysis of a historical building". *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, 18(8): 777-784.
10. De Stefano A., Matta E., Clemente P. (2016). "Structural health monitoring of historical heritage in Italy: some relevant experiences". *J. of Civil Structural Health Monitoring*, 6(1): 83-106.
11. Puzzilli L., Bongiovanni G., Clemente P., Di Fiore V., Verrubbi V. (2021). "Effects of Anthropogenic and Ambient Vibrations on Archaeological Sites: The Case of the Circus Maximus in Rome". *Geosciences* 2021, 11: 463.