

Tavole vibranti e protezione antisismica di edifici e monumenti storici

Le prove su tavola vibrante costituiscono la tecnica più affidabile di sperimentazione in laboratorio nel campo dello studio delle vibrazioni. Presso la hall sismica del Centro di Ricerche ENEA della Casaccia (Roma) è collocato un impianto di tavole vibranti tra le più grandi d'Europa e all'avanguardia nella strumentazione e nelle tecniche di analisi dei dati di vibrazione acquisiti nelle prove sismiche, con notevoli applicazioni in recenti progetti sulla protezione e la conservazione dei beni culturali.

DOI 10.12910/EAI2022-023

di Ivan Roselli, Vincenzo Fioriti, Antonino Cataldo, Massimiliano Baldini, Alessandro Colucci, Alessandro Picca, Laboratorio Tecnologie per la Dinamica delle Strutture e la Prevenzione del rischio sismico e idrogeologico - ENEA

Le prove su tavola vibrante costituiscono la tecnica più affidabile di sperimentazione in laboratorio nel campo dello studio delle vibrazioni. Infatti, si tratta dell'unica tecnica in grado di riprodurre realisticamente l'eccitazione vibrazionale di origine naturale (come quella generata dai terremoti) o di origine antropica (come quella generata da vibrazioni industriali o nei mezzi di trasporti). Data la notevole difficoltà di eseguire queste sperimentazioni con forte scalatura degli oggetti studiati, le tavole vibranti di grandi dimensioni sono particolarmente preziose. Inoltre, di particolare pregio sono le tavole vibranti a 6 gradi di libertà (GDL), ovvero capaci di riprodurre una vibrazione in qualsiasi direzione e qualsiasi rotazione nello spazio.

Nella seconda metà degli anni '80 dello scorso secolo fu realizzato presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia una hall sismica dotata di 2 tavole vibranti a 6 GDL tra le più grandi d'Europa, ancora oggi all'avanguardia per dimensioni e prestazioni. All'epoca

era finalizzata alla verifica sismica di grandi componenti per centrali nucleari che dovevano soddisfare i rigorosissimi e onerosi requisiti prescritti dalle norme a livello internazionale in questo settore di cui l'ENEA era il riferimento nazionale. Successivamente, l'attività principale di questi impianti è stata rivolta ai settori dell'ingegneria industriale e civile con particolare riferimento allo studio di tecniche innovative per la protezione di oggetti e strutture dagli effetti dannosi delle vibrazioni. In effetti, oggi si può definire come il laboratorio che in ENEA si occupa dello studio sperimentale delle vibrazioni in generale, ed è molto attivo sia nella caratterizzazione del comportamento degli oggetti sottoposti a sollecitazione vibrazionale sia nello studio di tecniche di protezione dai danni che le vibrazioni possono indurvi.

Innovazione continua di strumentazioni e tecniche di analisi

Nel corso degli ultimi anni, inoltre, questi impianti sperimentali sono

stati arricchiti e innovati con l'acquisizione e lo sviluppo di nuove strumentazioni di misura e di nuove tecniche di analisi delle vibrazioni che rendono le capacità di sperimentazione di questo laboratorio una eccellenza che si rinnova continuamente ai livelli più alti. In particolare, nel 2007 è stato il primo laboratorio di ingegneria sismica al mondo ad essersi dotato di un sistema di motion capture 3D passivo dedicato a prove su tavola vibrante (**sistema 3DVision**).

Questo tipo di sistemi sono poi stati successivamente adottati anche in altri importanti laboratori di questo genere in Italia e all'estero. In breve, questo sistema è in grado di eseguire la misura dello spostamento nello spazio 3D di centinaia di punti dell'oggetto sottoposto ai test sismici con una accuratezza inferiore al decimo di mm e con una frequenza di campionamento fino a 2000 Hz [1]. Oltre a rappresentare un'applicazione all'avanguardia nella misura degli spostamenti, tale sistema è utilizzato in modo perfettamente integrato



con il laboratorio virtuale DYSCO (structural DYNamic, numerical Simulation qualification tests and vibration Control), che consente la condivisione interattiva in tempo reale con utenti remoti della sperimentazione in corso, e può quindi dare un contributo alla disseminazione dei risultati della ricerca scientifica sia a livello di formazione (per studenti e professionisti del settore) che di partecipazione attiva da parte di partner di ricerca collocati fisicamente ovunque nel mondo [2].

Grazie all'aggiornamento del 2016 nell'ambito del progetto COBRA (Conservazione dei Beni culturali, basati sull'applicazione di Radiazioni e di tecnologie Abilitanti) e all'estensione e al rinnovamento continuo dei suoi componenti, il sistema 3D Vision rimane a tutt'oggi il più avanzato nel suo genere in Italia.

Dal 2017, inoltre, è stata introdotta nello studio dei test di vibrazione anche una nuova tecnica di elaborazione avanzata derivata dal metodo del moto magnificato, in grado di fornire indicazioni sulla risposta di un ogget-

to sottoposto a vibrazione dall'analisi di semplici filmati [3], il che rappresenta l'ultima frontiera dello studio delle vibrazioni tramite strumenti di visione digitale.

A testimonianza del continuo impegno di ENEA ad aggiornare e rinnovare la hall sismica, è in corso un adeguamento delle attrezzature e delle apparecchiature del laboratorio per il suo inserimento nella piattaforma FIXLAB del nodo italiano (E-RIHS.it) della rete europea E-RIHS (European Research Infrastructure for Heritage Science), la rete di laboratori in grado di offrire accesso a strumenti scientifici e conoscenze all'avanguardia nel settore dei Beni Culturali. Tutte queste potenzialità ed eccellenze sono state applicate di recente con successo in diversi progetti sulla protezione e la conservazione del patrimonio storico-artistico.

Il progetto RestArt

Un'esperienza appena conclusa è stata quella del progetto RestArt finanziato su bando POR FESR 2014-2020, con

risultati di grande successo. Il progetto mirava a sviluppare una tecnologia innovativa per il restauro di statue ed elementi architettonici lapidei di grandi dimensioni; in particolare, si tratta di un metodo innovativo per la ricomposizione di grandi frammenti lapidei tramite un sistema meccatronico di alta precisione¹. Al fine di verificare l'efficacia dell'innovativo metodo di imperniaggio di precisione sono state svolte presso il Centro di ricerca ENEA Casaccia una serie di prove su tavola vibrante [5] (figura 1). Nello specifico, sono stati realizzati dei provini costituiti da pilastri in marmo e in travertino che sono stati rotti a metà in modo da simulare dei frammenti lapidei di opere antiche. I provini sono poi stati ricomposti (con il metodo innovativo sviluppato nel progetto, e, per confronto, con la tecnica di imperniaggio tradizionale) e sottoposti a sollecitazioni a intensità estremamente elevata, riproducendo la vibrazione generata da terremoti estremi o da trasporti ad alta velocità su strada fortemente sconnessa.

Le prove su tavola vibrante hanno

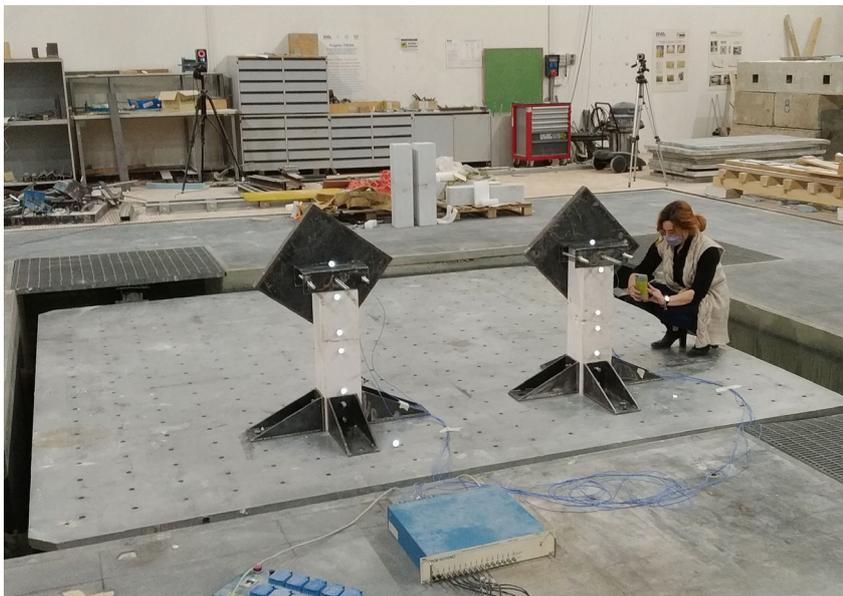


Fig. 1 Allestimento di prova su tavola vibrante per il confronto della resistenza a vibrazione sismica di un provino in marmo ricomposto con tecnica tradizionale (sinistra) e uno ricomposto con sistema RestArt (destra)

dimostrato la grande efficacia del nuovo metodo. I provini così ricomposti, infatti, hanno evidenziato una resistenza molto maggiore alle sollecitazioni meccaniche rispetto a quelli ricomposti con la tecnica tradizionale, oltre ad avere il vantaggio di consentire ai restauratori una movimentazione e una gestione dei grandi frammenti più agevole, veloce e sicura. Inoltre, la maggiore precisione nella lavorazione dei frammenti consente una minore invasività dell'intervento e un maggiore rispetto del materiale antico. In questo modo l'ENEA ha contribuito a validare una innovazione tutta italiana nel settore, permettendo alla società privata Ma.Co.Rè. capofila del progetto RestArt, di eseguire già nei mesi scorsi diversi interventi di restauro, tra cui la notevole ricomposizione della statua di Diana Cacciatrice in marmo Thassos presso il Museo Pio Capponi di Terracina. Questa statua era conservata nei depositi del museo in quattro grandi frammenti (torso, braccio destro, testa e base con gamba destra) che sono stati rassembrati con

grade efficacia, consentendo al museo di rimettere la statua nella sua naturale posizione verticale e collocarla in esposizione.

Basamenti antisismici per statue

Un'altra linea di ricerca che ha avuto molto risalto è stata quella sulla validazione sperimentale di sistemi di isolamento di statue e oggetti museali. Questa linea ha condotto i ricercatori ENEA a progettare e validare negli scorsi anni i basamenti antisismici per i Bronzi di Riace, su cui oggi le due famose statue sono esposte presso il Museo Archeologico Nazionale di Reggio Calabria, nonché per varie altre importanti statue del Duomo di Orvieto e del prospiciente museo [6]. Su questa linea si è avviato da alcuni mesi un nuovo progetto dall'acronimo evocativo, MONALISA (MONitoraggio Attivo e Isolamento da vibrazioni e Sismi di oggetti d'Arte), nell'ambito del Distretto Tecnologico Culturale (DTC) Lazio, dedicato allo sviluppo sperimentale della tecnica dell'isolamento sismico per

l'applicazione agli oggetti d'arte, con estensione alla protezione dalle vibrazioni in genere, incluse quelle da traffico su strada e rotaia, un aspetto molto rilevante nei centri storici delle città d'arte. Il progetto, coordinato dall'Università La Sapienza di Roma e con i partner Università degli Studi Roma Tre e Somma s.r.l. prevede la sperimentazione su tavola vibrante sotto forzante sismica di un sistema di isolamento per il "Sarcofago degli Sposi" del Museo Nazionale Etrusco di Villa Giulia a Roma.

Molto importante è anche la linea di ricerca che studia le nuove tecniche di rinforzo antisismico delle murature storiche. Questo tema è molto rilevante, in particolare nel nostro Paese, in quanto buona parte del patrimonio costruito esistente nelle zone a media e alta sismicità è rappresentato da questa tipologia di costruzioni, le quali sono spesso caratterizzate da scarsa qualità ed elevata vulnerabilità sismica (figura 2), e di cui le conseguenze provocate nella sequenza sismica dell'Italia centrale 2016-2017 che ha colpito Amatrice sono solo l'ultimo tragico esempio [7].

Il gruppo di ricerca delle tavole vibranti dell'ENEA ha ormai una lunga tradizione ed esperienza su questo



Fig. 2 Collasso durante prova su tavola vibrante di un pannello in muratura storica tipica della zona epicentrale della sequenza sismica dell'Italia centrale 2016-2017- paramento esterno.

tema, avendo testato svariate tecniche di rinforzo per la muratura storica nel corso degli anni alcune delle quali sono state brevettate e commercializzate proprio a valle di queste sperimentazioni. Tra i sistemi di rinforzo sperimentati, ad esempio, i sistemi CAM e DIS-CAM dell'azienda EDIL CAM Sistemi S.r.l. testato nel progetto TREMA negli anni 2003-2007 [8].

Il progetto RIPARA

Proprio la EDIL CAM Sistemi S.r.l. è il partner aziendale dell'ultimo progetto appena iniziato nell'ambito del DTC Lazio su questo filone di ricerca, denominato RIPARA (Sistemi integrati di miglioramento sismico del patrimonio architettonico), coordinato dall'Università degli Studi Roma

Tre e con la partecipazione anche delle Università La Sapienza di Roma e di Cassino e Lazio Meridionale. Obiettivo è quello di mettere a punto una evoluzione del sistema CAM che sia meno invasivo dal punto di vista estetico per consentire l'applicazione alla muratura storica faccia vista, così da mantenere il suo aspetto esterno tradizionale pur incrementando considerevolmente la resistenza sismica complessiva della struttura. Più nel dettaglio, si esplorerà un sistema di rinforzo basato su micro-trefoli o bande sottili di acciaio inox, che garantiscano la connessione tra i paramenti murari, impedendone la disgregazione, ma nascosti nei giunti di malta e nella sezione del muro (connettori passanti) per minimizzarne l'impatto visivo. I materiali e le solu-

zioni tecniche previste assicurano durabilità e reversibilità degli interventi. Sarà anche impiegato un sistema integrato di monitoraggio con fibre ottiche che permetterà una manutenzione tempestiva e mirata.

A questo scopo, nei prossimi mesi sarà costruita, in una apposita area di cantiere allestita all'interno della hall sismica, una casetta in muratura storica. La casetta sarà testata su tavola vibrante, sia con il rinforzo innovativo che senza rinforzo. L'analisi del confronto dei risultati ottenute dalle due configurazioni porterà ad una valutazione dell'efficacia della nuova soluzione antisismica.

Per info: ivan.roselli@enea.it

BIBLIOGRAFIA

1. G. De Canio, G. de Felice, S. De Santis, A. Giocoli, M. Mongelli, F. Paolacci, I. Roselli, (2016) "Passive 3D motion optical data in shaking table tests of a SRG-reinforced masonry wall", *Earthquakes and Structures*, 40(1), pp. 53-71, ISSN: 2092-7614, DOI: 10.12989/eas.2016.10.1.053.
2. G. De Canio, M. Mongelli, I. Roselli, (2013) "3D Motion capture application to seismic tests at ENEA Casaccia Research Center: 3DVision system and DySCo virtual lab", *WIT Transactions on The Built Environment*, 134, pp. 803-814, ISSN: 1743-3509, DOI: 10.2495/SAFE130711.
3. V. Fioriti, I. Roselli, A. Tati, G. De Canio, (2017) "Applicazione della vibrometria visuale alla sperimentazione sismica su tavola vibrante", *Proc. of 17th Conferenza Nazionale della Associazione Italiana Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica*, Milano, ottobre 25-27.
4. P. Nardelli (2021) "Apparato per la rilevazione, misurazione e movimentazione per ricomposizioni di oggetti fratturati e relative a tecnica di utilizzo dello stesso", *Brevetto Italiano applicazione n. 102021000001973*, data 1 Febbraio 2021.
5. P. Nardelli, M. Pavan, G. Pompa, S. Borghini, M. Baldini, A. Colucci, V. Fioriti, A. Picca, A. Tati, I. Roselli (2021) "Sistema RestArt per la ricomposizione ad alta precisione di opere d'arte lapidee frammentarie", *Archeomatica*, 13(2), pp. 10-13, ISSN: 2037-2485.
6. De Canio, G. (2015) "New anti seismic basements for high vulnerable statues in Italy", *Proc. of 4th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures*, San Diego, Ca, USA, settembre 9-11.
7. G. de Felice, D. Liberatore, S. De Santis, F. Gobbin, I. Roselli, M. Sangirardi, O. Al Shawa, L. Sorrentino, (2022) "Seismic behaviour of rubble masonry: shake table test and numerical modelling", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, pp. 1-22 (on-line), ISSN: 1096-9845, DOI: 10.1002/eqe.3613.
8. M. Dolce, F.C. Ponzo, C. Moroni, D. Nigro, A. Goretti, F. Giordano, G. De Canio, R. Marnetto. (2006) "3D dynamic tests on 2/3 scale masonry buildings retrofitted with different systems", *Proc. of 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Ginevra, Svizzera, settembre 3-8, ISBN: 9781615676750.

1. Messo a punto ed ideato dall'Arch. P. M. Nardelli [4] per Ma.Co.Rè. s.r.l., partner capofila del progetto RestArt,