

SPERIMENTAZIONE DELL'ENEA CONDIVISA IN REMOTO PER LA DIFFUSIONE DI TECNOLOGIE INNOVATIVE DI PROTEZIONE ANTISISMICA

di Vincenzo Fioriti, Roberto Romano, Ivan Roselli, Angelo Tati, Alessandro Colucci, Marialuisa Mongelli, Gerardo De Canio



Fig. 1 - Le due tavole vibranti presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia.

L'adeguamento del laboratorio delle tavole vibranti del Centro Ricerche ENEA di Casaccia all'interno del progetto CO.B.R.A. finanziato dalla Regione Lazio permette di migliorare la diffusione e la condivisione da remoto della sperimentazione di tecnologie antisismiche per la protezione di strutture storiche e opere d'arte dai terremoti

Il laboratorio del Centro di Ricerca ENEA Casaccia è dotato di due tavole vibranti a 6 gradi di libertà fra le più grandi d'Europa, che consentono di effettuare prove sismiche triassiali. Le prove su tavola vibrante hanno una decisiva importanza ai fini della comprensione del comportamento dinamico delle strutture sotto l'azione dei carichi sismici (De Canio et al. 2016), consentendo anche la validazione dei modelli numerici, poiché forniscono misure atte a calcolare gli smorzamenti, le frequenze critiche ed i principali modi di vibrazione. Nell'ambito del progetto CO.B.R.A. per lo sviluppo e la diffusione di metodi, tecnologie e strumenti avanzati per la Conservazione dei Beni culturali, basati sull'applicazione di Radiazioni e di tecnologie Abilitanti, il laboratorio (Figura 1) è stato aggiornato con l'adeguamento di un innovativo sistema optoelettronico di *motion capture* 3D, in grado di inseguire gli spostamenti di singoli punti della superficie dei campioni, punti identificati da appositi marker (Roselli et al. 2015, Mongelli et al. 2011). Tramite tale sistema di misura, denominato 3Dvision, il primo al mondo ad essere stato installato in un laboratorio per prove dinamiche in ambito sismico, è possibile visualizzare i dati di vibrazione e i video del provino per trasmetterli in tempo reale su una piattaforma per la condivisione di tali informazioni che costituisce un vero e proprio laboratorio virtuale accessibile tramite un portale web.

Oltre alle tecniche più consolidate per l'analisi dei dati di vibrazione in queste prove sperimentali è stata esplorata anche la fattibilità di una innovativa tecnica di processamento di sequenze video, denominata analisi del Moto Magnificato (MM), che permette di visualizzare e analizzare minimi movimenti che non sono visibili a occhio nudo al fine di monitorare e comprendere il comportamento vibrazionale degli oggetti.

Nel seguito vengono descritte le prove su tavola vibrante effettuate su due pannelli in muratura tipica del patrimo-

nio edificato storico italiano e su un piedistallo isolato per statue a prevalente sviluppo verticale dotato di dispositivi elettromagnetici di *blocco-sblocco* attivabile da un segnale proveniente da un sistema di allerta tempestivo (*early warning*) in caso di terremoto, nonché i sistemi e le tecniche di misura e analisi dati che sono stati impiegati al fine di una sperimentazione il più possibile condivisibile e fruibile anche a distanza al fine della diffusione e formazione sui temi della protezione sismica del patrimonio culturale.

ADEGUAMENTO DELLA STRUMENTAZIONE OPTOELETTRO- NICA DEL 3DVISION

Nell'ambito delle prove sismiche su tavola vibrante nel progetto CO.B.R.A. i dati sono stati acquisiti mediante un sistema di tipo *motion capture* 3D passivo, denominato 3Dvision, adeguato tramite l'acquisto all'interno del progetto di nuova strumentazione installata nel marzo 2016 con la quale il laboratorio ENEA è il primo in Italia ad aver installato la versione più avanzata di questo tipo di strumentazione optoelettronica basata su tecnologia Vicon.

Tale sistema impiega una costellazione di 10 telecamere all'infrarosso vicino (NIR) che svolgono una funzione analoga ai satelliti dei sistemi di posizionamento globale (ad esempio il GPS). Si tratta, cioè, di un sistema di posizionamento "locale" in cui le telecamere, una volta fissate alle pareti o montate su appositi tripodi, illuminano il volume di misura con appositi led a luce infrarossa e acquisiscono la radiazione retro riflessa da marcatori (marker) passivi fissati nei punti di cui si vuole misurare il moto. Il dato di base è costituito dalla traiettoria nello spazio di speciali marcatori con cui è possibile ricavare il moto completo dei punti selezionati (spostamenti, velocità e accelerazioni), nonché effettuare misure della distanza tra due punti o dell'angolo formato dalle rette congiungenti tre punti.

Trattandosi di un sistema di visione 3D, la risoluzione geo-

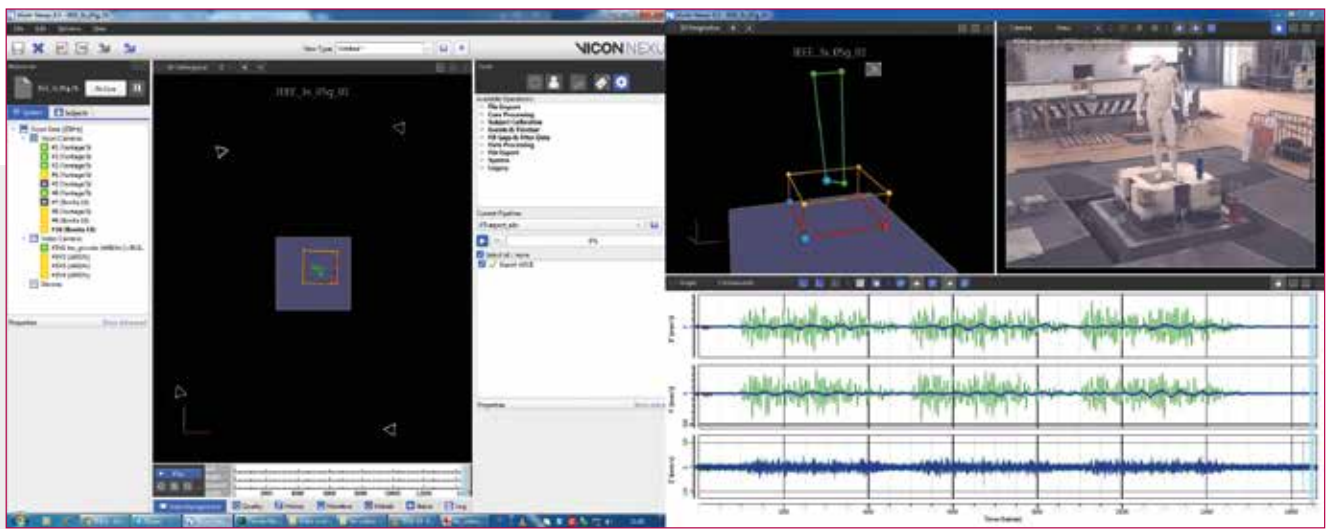


Fig. 2 - Visualizzazione delle misure di vibrazione tramite 3DVision del basamento isolato dotato di sistema di blocco-sblocco (early warning).

metrica raggiungibile dipende da una serie di fattori tra i quali: la configurazione adottata, cioè dalla posizione reciproca delle telecamere; la visibilità dei marker; e la qualità della calibrazione dinamica, che consiste in una procedura di acquisizione effettuata con uno strumento di calibrazione che si muove all'interno del volume di misura. In pratica sul modello della struttura da testare, posto sulle tavole sismiche, vengono posizionati dei marker sferici del diametro di 25-40 mm che riflettono la radiazione che le camere irradiano nel loro campo visivo per mezzo di LED che emettono nel vicino infrarosso (NIR).

Il sistema 3DVision consente, inoltre, di realizzare filmati dei test con la sovrapposizione di un modello schematico che permette di visualizzare la effettiva posizione dei marker. In questa ottica è integrato nel laboratorio virtuale DYSCO (structural DYNamics, numerical Simulation, qualification tests and vibration COntrol), che consente la messa in rete e la condivisione a distanza delle attività sperimentali condotte presso il C.R. ENEA Casaccia (De Canio et al. 2013). Dopo l'acquisizione i dati vengono pre-processati, triangolando la posizione dei marker, e successivamente post-processati con particolari tecniche che, attraverso la riduzione del rumore di misura, permettono di raggiungere una precisione inferiore al 0.01 mm in termini di errore quadratico medio. Con le suddette tecniche si possono sottoporre tali dati a successive operazioni di derivazione numerica per una ricostruzione del moto completo dei punti di misura, ottenendo quindi, una stima della velocità ed delle accelerazioni di ogni marcatore.

APPLICAZIONE DELL'ANALISI DEL MOTO MAGNIFICATO (MM)

L'idea di sfruttare registrazioni video per analizzare strutture, ponti, edifici non è nuova, ma fino a pochissimi anni fa non si erano ottenuti risultati apprezzabili, soprattutto a causa delle difficoltà connesse alla elaborazione delle immagini. Tuttavia di recente sono stati compiuti grandi progressi grazie a nuovi algoritmi sviluppati presso il Massachusetts Institute of Technology di Boston dal gruppo di lavoro di Freeman (Wadhwa et al. 2017). Tali algoritmi, denominati moto magnificato (MM) od aumentato (MA), sono in grado di amplificare i piccoli e piccolissimi spostamenti che una struttura subisce a seguito di una qualche sollecitazione e che in genere non sono rilevabili. In un certo senso, i piccoli moti presenti nel video originale vengono amplificati nel video processato come se si disponesse di un microscopio. Il video, preferibilmente ma non necessariamente registrato con videocamere ad alta velocità ed alta risoluzione, è

apparentemente statico, cioè non vi si discerne alcun movimento, ma una volta elaborato mette in mostra una serie di evidenti movimenti. Inizialmente il MM è stato impiegato per visualizzare fenomeni della fisiologia umana, in seguito ci si è resi conto delle potenzialità in altri ambiti, quali la meccanica e l'ingegneria civile. Per validare il MM sono stati effettuati confronti fra i segnali estratti con metodi tradizionali da elementi semplici come la sbarra vincolata, elementi piani risonanti o strutture complesse come il ponte ed i segnali ricavati dal moto magnificato (Davis et al. 2016), ottenendo buoni risultati qualitativi e quantitativi. Per estendere tali risultati al settore dell'ingegneria sismica, presso il laboratorio del C. R. ENEA Casaccia sono stati intrapresi degli esperimenti di MM nell'ambito del Progetto CO.B.R.A., finanziato dalla regione Lazio con lo scopo di propagare tecniche innovative al patrimonio culturale. Pertanto, anche in considerazione dei presumibili sviluppi che il MM potrà apportare nell'ingegneria civile e particolarmente in quella sismica, abbiamo sperimentato la nuova metodologia sulla vibrazione indotta sui pannelli murari dai test su tavola vibrante del C. R. ENEA Casaccia. Un primo evidente vantaggio consiste nella possibilità di evitare l'esecuzione della caratterizzazione dinamica a livelli di accelerazione elevate, con possibile danneggiamento dei campioni prima ancora di sottoporli ai test sismici. Infatti, grazie al MM se nei test sismici non ci si discosta troppo dal regime di linearità, già nelle prime fasi della sperimentazione con test sismici scalati a livelli di accelerazione molto bassi, è possibile osservare quali sarebbero gli effetti di scosse estremamente forti pur somministrando in realtà delle sollecitazioni di bassa intensità. I campioni quindi rimangono intatti e riutilizzabili, con notevole risparmio di tempo e risorse. Un altro non meno rilevante vantaggio consiste nell'utilizzo della superficie ripresa dalla videocamera come matrice di "sensori virtuali". In pratica ogni pixel è interpretato come un sensore che produce un segnale lungo quanto il video, frame dopo frame. Il segnale è dato dalla variazione di intensità del pixel o della media di un gruppo di pixel ed è trattato tramite l'analisi in frequenza tradizionale.

PROVE SU TAVOLA VIBRANTE

Una prima dimostrazione di sperimentazione condivisione è stata eseguita in occasione del secondo workshop del progetto CO.B.R.A. tenutosi a gennaio del 2017, nel quale è stata testata l'efficacia della condivisione con la nuova strumentazione installata.

Nei giorni dal 21 al 24 febbraio 2017 è stata allestita ed eseguita una dimostrazione di sperimentazione internazionale condivisa a distanza. I test sismici effettuati su tavole vibranti hanno riguardato l'efficacia di un basamento dotato di isolamento antisismico di tipo a pendolo a rotolamento, prototipo per la progettazione di quelli allestiti per i Bronzi di Riace presso il Museo Archeologico Nazionale di Reggio Calabria (De Canio et al. 2012). La condivisione remota è stata realizzata nell'ambito dello "Smart City Summit" di Taipei con collegamento diretto al laboratorio delle tavole vibranti del Centro di Ricerca ENEA Casaccia. Grazie al sistema DYSCO, gli utenti collegati in remoto presso l'Università di Taipei ed in altre località hanno assistito ai test sismici e sono intervenuti tramite il collegamento chat, previa registrazione. Tramite tecnologia Adobe Connect, DYSCO ha consentito il collegamento video/audio con le telecamere poste intorno alla tavola ed i microfoni a numerosi fruitori, oltre ad una chat gestita dall'amministratore che controlla i collegamenti dal laboratorio ed illustra i dettagli degli esperimenti. Contemporaneamente, agli utenti è stato anche possibile vedere i tracciati e le elaborazioni realizzati dal sistema 3DVision che insegue gli spostamenti della struttura in esame, così come li osserva l'operatore in laboratorio. In modo del tutto analogo è stata ripetuta la condivisione della sperimentazione su tavola vibrante in occasione del quarto workshop CO.B.R.A. del 13 settembre 2017. In quest'ultima occasione il basamento isolato è stato dotato anche di dispositivi di *blocco-sbocco* di tipo elettromagnetico per l'integrazione in un sistema di allerta precoce (*early warning*) in caso di terremoto (fig.2). Tale soluzione consente di mantenere ancorato il basamento superiore a quello inferiore in assenza di terremoto, mentre, nel momento in cui appositi sensori rilevano le prime vibrazioni del terremoto, viene inviato il segnale di warning al sistema che sblocca il basamento superiore e consente l'attivazione dell'isolamento sismico prima che giungano le vibrazioni più forti e distruttive del sisma che hanno generalmente alcuni secondi di ritardo rispetto all'inizio della scossa.

Un'altra attività sperimentale eseguita su tavola vibrante è stata sviluppata per testare l'efficacia di interventi di ripristino e rinforzo di due pannelli in pietra e tufo, secondo delle tipologie di muratura tipiche delle costruzioni storiche del centro-sud italiano. Tale territorio è spesso colpito da terremoti che hanno effetti distruttivi su queste tipologie costruttive, ed è quindi naturale la ricerca di tecniche per aumentare la resistenza della muratura ad un costo contenuto. Tutto il processo, dalla progettazione dei pannelli e della struttura in acciaio, alle prove sismiche ed alle valutazioni comparative dei risultati sono stati oggetto di due tesi di laurea presso l'Università Roma Tre (Fantauzzi 2017, Focaccetti 2017).

Una prima sessione di test è stata effettuata nel dicembre 2016 sui due muri senza rinforzo fino a rottura. La sequenza sismica a cui sono stati sottoposti i muri includeva i principali terremoti italiani registrati dalle stazioni sismiche presenti sul nostro territorio. In particolare:

- ▶ Irpinia 1980;
- ▶ Umbria-Marche 1997;
- ▶ L'Aquila 2009;
- ▶ Emilia 2012;
- ▶ 2016.

Le suddette registrazioni sono state scalate e somministrate tramite la tavola vibrante a intensità via via crescente fino alla rottura dei provini. Ogni test sismico è stato interca-

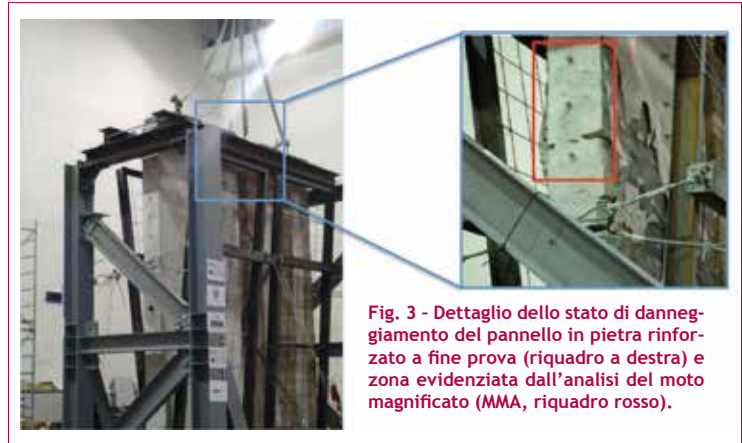


Fig. 3 - Dettaglio dello stato di danneggiamento del pannello in pietra rinforzato a fine prova (riquadro a destra) e zona evidenziata dall'analisi del moto magnificato (MMA, riquadro rosso).

lato da un test di identificazione dinamica di tipo random che serve ad analizzare lo stato di integrità strutturale dei muri, in modo da poter seguire gradualmente il processo di danneggiamento dei provini.

La condivisione a distanza della sperimentazione ha coinvolto partner di ricerca e end-user in ambito nazionale o internazionale. Nello specifico i test sono stati condivisi con il gruppo di ricerca della University of Miami (Coral Gables, Miami, FL, USA) guidata dal prof. Antonio Nanni, che è partner nell'ambito di un progetto di ricerca dal titolo "Composites with inorganic matrix for sustainable strengthening of architectural heritage", coordinato dall'Università degli Studi Roma Tre (principal investigator: prof. Gianmarco de Felice) e cofinanziato dal Ministero degli Affari Esteri (MAE-CI). Queste prove hanno avuto anche notevole riscontro da parte della stampa nazionale con servizi televisivi (RAI2 e Repubblica TV), dirette su social network (sull'account facebook di La Repubblica), articoli su quotidiani (La Repubblica, ILSOLE24ORE) e su siti web di professionisti del settore (www.ingegneri.info, www.cngeologi.it).

Successivamente, i due muri sono stati riparati e rinforzati per poi essere risottoposti alla stessa sequenza di test sismici su tavola vibrante (fig. 3) al fine di fare un confronto del comportamento strutturale dopo l'intervento, il quale si compone di due fasi:

1. realizzazione di un cordolo sommitale in muratura armata, rinforzato mediante messa in opera di un tessuto in trefoli di acciaio ad alta resistenza nei giunti di letto, e collegato alle murature sottostanti per mezzo di connettori o barre di acciaio. L'intervento ha la fun-

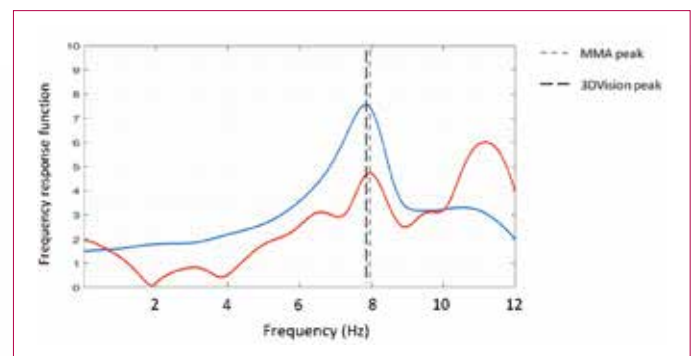


Fig. 4 - Risposta in frequenza del pannello murario in pietra calcolata con l'analisi del moto magnificato (MMA, linea rossa) e con i dati dei marker del 3DVision (linea blu). Sono evidenziati i picchi che identificano il primo modo di vibrare della struttura.

zione di costituire un vincolo alla sommità della parete, impedendo l'innescio di meccanismi di ribaltamento per effetto di azioni sismiche ortogonali al piano;

2. applicazione sulla superficie dei pannelli di muratura di compositi a matrice inorganica (Textile Reinforced Mortar, TRM) costituiti da un tessuto unidirezionale in trefoli di acciaio ad alta resistenza (per il campione in muratura di tufo) e una rete bidirezionale in fibra di basalto e acciaio inox (per il campione in muratura di pietrame), applicati per mezzo di malte a base di calce idraulica matura. L'intervento ha la funzione di migliorare la resistenza flessionale delle pareti sollecitate fuori dal piano;

Gli esperimenti condotti hanno dimostrato l'efficacia delle tecniche di rinforzo a cui sono stati sottoposti i pannelli, che sono stati in grado di sostenere scosse di intensità molto più elevata che senza rinforzo.

Nell'ambito di questi ultimi test sono state testate le innovative tecniche di analisi visiva delle vibrazioni dei pannelli tramite algoritmi di analisi del moto magnificato (MMA). In particolare, questa tecnica è stata applicata sui test di tipo random. Infatti, trattandosi di una procedura necessaria all'identificazione dinamica della struttura e al tuning dei parametri di controllo della tavola, l'input vibrazionale a cui è sottoposto il provino è di intensità molto bassa e, quindi, le vibrazioni del pannello nei video originali sono praticamente impossibili da notare a occhio nudo. La strumentazione utilizzata per acquisire i dati è un *tablet* commerciale, la cui risoluzione (720 x 1280 pixel) e la velocità delle riprese video (28 fps) è piuttosto modesta. Questo al fine di esplorare l'efficacia del metodo con strumenti di bassa gamma, se non low-cost, che sarebbe uno degli aspetti più interessanti di questa tecnica, la cui efficacia è stata già dimostrata con costose videocamere ad altissima velocità (500-2000 fps).

Effettivamente, una volta settati in modo ottimale i parametri dell'algoritmo implementato per l'elaborazione dei

video acquisiti, il moto magnificato è stato in grado di rivelare i movimenti del pannello, con oscillazioni concentrate in specifiche zone del provino. Quando, successivamente, il pannello è stato sottoposto all'equivalente della scossa del terremoto di Amatrice, si sono prodotte delle fratture nell'area evidenziate dalla MMA, corrispondenti al riquadro indicato in Figura 3.

La MMA si è rivelato, quindi, in grado di fornire visivamente indicazioni predittive sulle zone più critiche e sull'integrità della struttura muraria prima che si concretizzasse il danneggiamento palese del muro.

È stato anche eseguito il calcolo della funzione di risposta in frequenza (FRF) sulla base di dati ottenuti tramite i "sensori virtuali" del MM. I sensori virtuali sono costituiti dall'insieme di 1580 pixel localizzati nel riquadro rosso in figura 4, i cui valori nel tempo sono a loro volta l'analogo dei segnali ottenibili da strumenti collocati a contatto sulla struttura sottoposta ai test sismici. Avendo acquisito i video a 28 fps (che rappresenta la frequenza di campionamento della misura) l'analisi tramite MM non può estendersi oltre il limite massimo teorico di 14 Hz (per il noto teorema di Nyquist-Shannon) e comunque l'identificazione delle frequenze risulta tanto più difficile quanto più ci si avvicina a tale limite. Conseguentemente, la sperimentazione effettuata con la strumentazione di modeste prestazioni utilizzata mirava a verificare se si riusciva a identificare le frequenze modali della struttura al di sotto dei 10-12 Hz.

Gli stessi calcoli sono stati eseguiti anche con dati misurati contemporaneamente con sensori accelerometrici convenzionali o provenienti dal sistema 3Dvision in modo da avere dei termini di confronto per verificare i risultati ottenuti con il metodo MM. In Figura 4 si mostra che la frequenza del primo picco di risonanza rilevata con la MM (pari a 7.9 Hz) sia molto vicina alla frequenza del primo picco ottenuto con l'analisi dei dati dei marcatori del 3Dvision (pari a 7.8 Hz), che a sua volta è pressoché coincidente con i risultati ottenuti con accelerometri convenzionali.

BIBLIOGRAFIA

- De Canio, G., de Felice, G., De Santis, S., Giocoli, A., Mongelli, M., Paolacci, F. & Roselli, I. (2016) Passive 3D motion optical data in shaking table tests of a SRG-reinforced masonry wall. *Earthquakes and Structures* 40(1), ISSN: 2092-7614, DOI: 10.12989/eas.2016.10.1.053.
- [2] Roselli, I., Mongelli, M., Tati, A. & De Canio, G. (2015) Analysis of 3D motion data from shaking table tests on a scaled model of Hagia Irene, Istanbul. *Key. Eng. Mat.* 624, 66-73.
- [3] Mongelli, M., De Canio, G., Roselli, I., Baldini, M., Colucci, A., Di Biagio, F., Picca, A., Tati, A., Cancelliere, N., Coniglio, L. & Ghersi, A. (2011) Experimental tests of reinforced concrete buildings and ENEA Dysco Laboratory. *5th Conference Structure Health Monitoring (SHMII-5)*, Cancùn, Mexico.
- [4] De Canio, G., Mongelli, M. & Roselli, I. (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, 803 - 814.
- [5] Wadhwa, N., Wu, H., Davis, A., Rubinstein, M., Shih, E., Mysore, G. J., Chen, J. G., Buyukozturk, O., Gutttag, J. V., Freeman, W. T. & Durand, F. (2017) Eulerian Video Magnification and Analysis. *Communications of the ACM* 60(1), 87-95.
- [6] Davis, A., Bouman, K.L., Chen, J.G. Rubinstein, M., Durand, F. & Freeman, W.T. (2017) Visual Vibrometry: Estimating Material Properties from Small Motions in Video. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 39(4), 732 - 745.
- [7] De Canio, G., Bonomi, S. & Cannistrà, A. (2012) Anti-Seismic Marble Base-ments for High Vulnerable Statues in Italy: Bronzes of Riace, Annunciazione by Francesco Mochi, San Michele Arcangelo by Matteo di Ugolino. *Energia Ambiente e Innovazione, Speciale: Knowledge, Diagnostics and Preservation of Cultural Heritage*.
- [8] Fantauzzi, D. (2017) Prove su tavola vibrante di pareti in muratura sollecitate fuori dal piano. Tesi di Laurea, Università Roma Tre.
- [9] Focaccetti, E. (2017) Prove su tavola vibrante di pareti in muratura rinforzate con materiali compositi a matrice inorganica comprendenti tessuti in acciaio e reti in fibra di basalto applicate con malte a base di calce idraulica naturale. Tesi di Laurea, Università Roma Tre, 2017.

ABSTRACT

Within the framework of the CO.B.R.A. project for the development and dissemination of methods, technologies and advanced tools for the conservation of cultural heritage, data and experimental results of several shaking table tests were remotely shared. Through the upgrading of the laboratory with new optoelectronic instrumentation and the application of innovative video processing techniques, the vibrations induced to two typical Italian historic masonry walls and to an isolated pedestal provided with early-warning system for delicate statues were measured and analyzed.

PAROLE CHIAVE

PROTEZIONE ANTISISMICA, SPERIMENTAZIONE CONDIVISA IN REMOTO, MOTION CAPTURE 3D, MOTO MAGNIFICATO, ALLERTA TEMPESTIVA

AUTORE

VINCENZO FIORITI
ROBERTO ROMANO
IVAN ROSELLI
IVAN.ROSELLI@ENEA.IT
ANGELO TATI
ALESSANDRO COLUCCI
MARIALUISA MONGELLI
GERARDO DE CANIO
GERARDO.DECANIO@ENEA.IT

ENEA, VIA ANGUILLARESE 301, 00123, S. MARIA DI GALERIA, ROMA