



# Valutazione del danno di una struttura in muratura storica sottoposta a prove sismiche su tavola vibrante tramite misure optoelettroniche 3D di spostamento

Ivan Roselli<sup>a</sup>, Vincenzo Fioriti<sup>a</sup>, Gerardo De Canio<sup>a</sup>, Michela Rossi<sup>b</sup>, Chiara Calderini<sup>b</sup>, Sergio Lagomarsino<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Dipartimento Sostenibilità, ENEA, Via Anguillarese 301, 00123 Roma, Italia

<sup>b</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale, Università di Genova, Via Montallegro 1, 16145 Genova, Italia

*Keywords: tavola vibrante; indici di danno; misura degli spostamenti; motion capture 3D; deformazioni*

## ABSTRACT

Ai fini dello studio della risposta sismica delle costruzioni, riveste un ruolo fondamentale il contributo della sperimentazione in laboratorio su prototipi di strutture in grande scala sottoposte a terremoti naturali o sintetici riprodotti tramite tavola vibrante di grandi dimensioni. In questo contesto, i recenti progressi nelle metodologie di misura degli spostamenti tramite sistemi optoelettronici 3D hanno mostrato elevate potenzialità. In particolare, la possibilità di acquisire un elevato numero di punti di misura permette di ricostruire il campo degli spostamenti in modo accurato e dettagliato. In questo modo si può studiare il comportamento dinamico della struttura esaminata sia a livello locale che globale. Oltre ad agevolare il rilievo accurato del quadro fessurativo, attraverso l'individuazione di fessure capillari poco visibili a occhio nudo, questi sistemi costituiscono uno strumento interessante per la quantificazione oggettiva del danno. In particolare, si propone di esplorare la possibilità di quantificare il danno tramite un indice sintetico basato sulle deformazioni cumulate alla fine di ogni test sismico. La metodologia è validata tramite il confronto con un indice di danno basato sulla variazione delle frequenze modali, approccio consolidato, ma influenzato dalle condizioni di fissaggio alla tavola e quindi non sempre affidabile in questo tipo di test. Nella presente memoria il metodo è applicato al caso studio di una volta a crociera in muratura storica rappresentativa di una porzione della moschea di Dey, Algeri. L'input sismico, basato sulla registrazione della stazione sismica di Keddara durante il terremoto del 21 maggio 2003, è scalato in intensità e somministrato in una sequenza sismica con step incrementali di 0.05g di PGA fino al collasso della struttura testata. I risultati ottenuti sono incoraggianti in quanto mostrano la potenzialità di ottenere un indice di danno semplice e ben correlato con quello usato come riferimento.

## 1 INTRODUZIONE

Ai fini della valutazione del danno delle strutture soggette a evento sismico molti parametri e indici sono stati sviluppati da differenti autori con diversi criteri. Tali indici di danno sono implementati in molti codici di modellazione numerica per il calcolo e la verifica strutturale (ad es. tramite il metodo degli elementi finiti, o FEM etc.). Questi indici sono stati validati generalmente tramite il confronto con il danno osservato sul campo dopo un terremoto, tipicamente valutato con i gradi di danno proposti da regolamentazioni e standard internazionali, utilizzati come riferimento. Ad es. la Scala Macrosismica Europea EMS-98 (Grünthal 1998) è ampiamente adottata a livello europeo, così come rappresenta un riferimento anche a livello

nazionale nell'ambito delle normative tecniche italiane (OPCM 2017).

Nonostante i metodi numerici siano oggi giorno ormai consolidati e diffusi per il calcolo del danno strutturale, lo studio della formazione e dell'evoluzione del danno, nonché delle prestazioni sismiche delle strutture deve essere considerato un obiettivo generale che ancora necessita la raccolta di dati sperimentali e l'esecuzione di test sismici in laboratorio. In questa direzione, la valutazione del danno su provini in scala reale testati su tavola vibrante di grandi dimensioni riveste una notevole importanza per il contributo che può fornire alla comprensione dei fenomeni di danneggiamento (Polimeno et al. 2018).

La presente memoria si focalizza sulla messa a punto di un metodologia per la costruzione di un indice di danno semplificato basato sui dati acquisiti da un sistema optoelettronico per la

misura degli spostamenti 3D di marcatori retroriflettenti. Questo tipo di sistemi di misurazione rappresentano uno strumento unico per registrare il campo di spostamenti di un elevato numero di punti della struttura esaminata in condizioni dinamiche, fino a 350 Hz di frequenza di campionamento (Roselli et al. 2018). Analizzando gli spostamenti relativi tra i marcatori durante i test dinamici, le deformazioni e le fratture possono essere rilevate e misurate, aprendo alla possibilità di formulare indici di danno dalle prove sismiche sperimentali.

La metodologia è qui illustrata e applicata a un caso studio rappresentato da un provino in scala reale di una porzione di una antica moschea di Algeri. Gli spostamenti dei marcatori collocati sul prototipo testato sono stati acquisiti e processati al fine di costruire un possibile indice di danno, validandolo per correlazione con un indice di danno consolidato basato sulla riduzione delle frequenze modali della struttura.

## 2 INDICI DI DANNO

In letteratura sono presenti una notevole quantità di indice di danno (DI) sono stati sviluppati dai vari autori sulla base di vari tipi di proprietà della struttura analizzata (Sinha e Shiradhonkar 2012). Tali proprietà possono essere strutturali o dinamiche, e gli indici possono essere calcolati a varie scale (locale o globale), così come possono essere presi in considerazione anche gli effetti a fatica dei materiali, tramite indici cumulativi (Williams e Sexsmith 1995). In generale, gli indici di danno sono normalizzati in una scala tra 0 e 1, dove zero rappresenta lo stato iniziale non danneggiato, mentre 1 indica la situazione di collasso finale. Gran parte di tali indici sono stati definiti e consolidati tramite estensive ricerche e sia teorici che sperimentali, prevalentemente su elementi strutturali in calcestruzzo armato (c.a.), che rappresenta la tipologia costruttiva più comune e diffusa in molte parti del mondo. Dall'altra parte, le strutture in c.a. sono progettate con schemi piuttosto semplici e ripetitivi, almeno nella maggior parte dei casi, e hanno un comportamento più omogeneo e controllabile dal punto di vista del calcolo strutturale in confronto alle strutture in muratura storica, caratterizzate tipicamente da disomogeneità e incertezze maggiori, ancorché eseguite in epoche remote in cui il concetto stesso di progettazione strutturale non era confrontabile agli standard odierni. Inoltre, le strutture in muratura iniziano a presentar spesso ampie fratture prima ancora che

si evidenzino un danneggiamento isteretico rilevante. Conseguentemente, la definizione stessa di un indice DI efficace e appropriato per le costruzioni in muratura storica è un argomento particolarmente complesso (Parisi e Augenti 2013).

Al fine di utilizzare un DI per descrivere le condizioni in cui versa una struttura dopo un terremoto, sono state sviluppate delle tabelle di correlazione tra i valori di DI e i livelli degli stati di danneggiamento, generalmente in Europa con i gradi della scala macrosismica EMS-98. Quella illustrata in Tabella 1 a titolo di esempio è stata sviluppata recentemente per costruzioni in c.a. in Croazia (Hadzima-Nyarko 2011).

Tabella 1. Correlazione tra i valori di indice di danno (DI) e i gradi della EMS-98 (Hadzima-Nyarko 2011).

DI	Descrizione del danno strutturale	Gradi di danno (EMS-98)
$0 < DI \leq 0.3$	Insignificante	1°
$0.3 < DI \leq 0.5$	Moderato	2°
$0.5 < DI \leq 0.8$	Severo	3°
$0.8 < DI \leq 1.0$	Forte	4°
$DI > 1.0$	Collasso	5°

Negli ultimi anni sono stati sviluppati approcci specifici per la muratura storica, come nello studio delle chiese antiche (Lagomarsino et al. 1997), in cui sono stati presi in considerazione particolare il ruolo dei meccanismi di danneggiamento e di collasso, nonché le caratteristiche dei differenti macroelementi.

### 2.1 Indici di danno basati su deformazioni energia

Tra i DI sviluppati dagli anni '80 dello scorso secolo, vari autori hanno tentato di implementarne sulla base delle deformazioni della struttura, partendo da una sorta di estensione del concetto di duttilità in campo dinamico (Williams e Sexsmith 1995). Altri autori, invece, si sono concentrati sullo studio dei fenomeni associati all'assorbimento di energia nei cicli isteretici come misura principale per quantificare il danneggiamento strutturale (Williams e Sexsmith 1995).

In seguito, modellazioni più complesse hanno tentato di considerare entrambi gli aspetti, implementando indici combinati. Questo è il caso dell'indice più diffuso e utilizzato, proposto nel 1984 da Park e Ang (Park et al. 1984) come una combinazione lineare di due termini normalizzati dello spostamento massimo e dell'energia dissipata. Secondo la formulazione più diffusa tale indice può essere espresso come segue

$$I_D = \frac{d_m}{d_u} + \beta_e \frac{\int dE}{F_y d_u} \quad (1)$$

dove  $d_u$  è lo spostamento ultimo a carico monotonic,  $d_m$  è lo spostamento massimo corrispondente al punto di massima capacità,  $\beta_e$  è un coefficiente moltiplicativo del termine energetico,  $dE$  è l'energia isteretica dissipata incrementale e  $F_y$  è la forza longitudinale di snervamento delle barre d'armatura. Da una parte, la semplicità della calibrazione del modello suddetto tramite un gran numero di osservazioni sperimentali rende questa formulazione del DI un approccio molto consolidato, per quanto definito con chiaro riferimento alle strutture in c.a. e l'estensione ad altre tipologie costruttive impone cautela. Dall'altra parte, i problemi applicativi principali sorgono nella determinazione di  $d_u$  e, specialmente, di  $\beta_e$ . In particolare, studi empirici e relative equazioni di regressione in letteratura hanno prodotto valori abbastanza modesti di  $\beta_e$ , compresi tra 0.1 e 0.6, riscontrando che il termine energetico fornisce un contributo piuttosto limitato, spesso decisamente inferiore rispetto al contributo delle deformazioni (Williams e Sexsmith 1995).

Gli DI qui considerati sono generalmente calcolati a livello locale (ad es. a livello di singolo elemento strutturale o di macroelementi). In strutture multipiano il calcolo avviene spesso per ogni singolo piano. L'indice globale per la struttura nel suo complesso viene ottenuto tipicamente tramite operazioni di media ponderata degli indici locali. Ma ciò apre un'altra questione non banale, legata alla definizione dei "pesi" da attribuire, che dipende da valutazioni e criteri di una certa soggettività, attraverso considerazioni sulla differente rilevanza dei vari meccanismi di collasso che si attivano, nonché sulla ricaduta sulla stabilità complessiva di gravi danni localizzati. A tale riguardo, alcuni autori hanno proposto di considerare il contributo dell'assorbimento locale dell'energia sullo stato di danno generale come criterio oggettivo per la determinazione dei pesi (Williams e Sexsmith 1995). Ciò non toglie una difficoltà generale più pratica che teorica, relativa al fatto che nei test di laboratorio, come quelli su tavola vibrante, risulta molto complesso eseguire misure di tipo energetico esaurienti, ma vengono usualmente eseguite misure di parametri di moto (tipicamente spostamenti e accelerazioni) che si sono dimostrate, con gli strumenti oggi a disposizione, in grado di fornire una accurata descrizione del comportamento dinamico di strutture in scala reale.

## 2.2 Indici globali di danno basati sulla riduzione della rigidezza

Gli indici basati sulle proprietà dinamiche delle costruzioni sono ampiamente accettati come validi indicatori dello stato di salute globale della struttura (DiPasquale et al. 1990). Essi sono usualmente costruiti sulla base dei parametri modali della struttura esaminata. In particolare, si analizzano le variazioni delle frequenze modali, sulla base dell'osservazione che i processi di danneggiamento inducono una misurabile diminuzione della rigidezza del sistema. Una comune formulazione di questo tipo è la seguente

$$DI_f = 1 - \frac{f_d^2}{f_0^2} \quad (2)$$

dove  $f_0$  è la frequenza fondamentale iniziale della struttura non danneggiata e  $f_d$  è quella osservata dopo l'evento sismico con la struttura eventualmente danneggiata. Svariati metodi di analisi modale, come la Experimental Modal Analysis (EMA) basata sul calcolo della Frequency Response Function (FRF), la Operational Modal Analysis (OMA) o altri metodi di identificazione dinamica, possono essere impiegati per elaborare i dati acquisiti su tavola vibrante e stimare le frequenze modali della struttura studiata (Roselli et al. 2017). Questi metodi sono applicabili anche ai dati di spostamento dei marcatori del sistema di *motion capture* 3D. Infatti, l'elevata accuratezza delle misure di spostamento (0.01-0.1mm) è tale da consentire anche una efficace analisi modale, almeno per i modi a frequenze inferiori ai 10-12 Hz, quali sono le frequenze fondamentali delle strutture in grande scala generalmente studiate su tavola vibrante. La scelta del metodo più adatto si opera essenzialmente in funzione del tipo di test dinamico eseguito. Pur essendo l'uso di questo tipo di indici molto diffuso e consolidato, presenta lo svantaggio che i parametri modali, dipendono dalle condizioni di vincolo, cioè, nell'impiego nei test su tavola vibrante, dalla tenuta perfetta del fissaggio alla tavola. Se questa, come a volte può succedere, non è garantita,

## 2.3 Costruzione di un indice di danno globale basato sugli spostamenti dei marcatori

La formulazione di un semplice indice di danno globale basato sugli spostamenti 3D dei marcatori acquisiti dal sistema di *motion capture* (De Canio et al. 2016) durante i test su tavola vibrante è esplorato nel prosieguo. La deformazione plastica globale cumulata (GRD)

alla fine di ogni test sismico può essere stimata tramite la seguente formulazione

$$GRD = \sum_i \Delta\delta_i / \delta_i \quad (3)$$

dove  $\delta_i$  è la distanza tra la  $i$ -sima coppia di marcatori adiacenti, mentre  $\Delta\delta_i$  ne è la variazione riscontrata alla fine del test sismico. Una formulazione generale per l'indice di danno può essere indicata come segue

$$DI_m = f(GRD, a, b) \quad (4)$$

dove  $f$  è una generica funzione, mentre  $a$  e  $b$  sono coefficienti empirici da determinare attraverso delle correlazioni con i risultati sperimentali ottenuti calcolando un indice di danno globale consolidato preso a riferimento.

In questo lavoro, è stato considerato come riferimento l'indice  $DI_f$  descritto dalla eq. 2 nella sezione precedente, una volta verificata la perfetta tenuta del fissaggio alla tavola, ad es. verificando che lo spostamento relativo tra i marker alla base del prototipo e quelli sulla tavola sono pressoché nulli. La funzione  $f$  può essere scelta *a priori* oppure si possono provare diverse funzioni tra cui scegliere quella che restituisce la migliore correlazione, valutabile come quella con il coefficiente di correlazione  $R^2$  più prossimo a 1. Nel seguito, l'applicazione della suddetta metodologia è illustrata con un caso studio. Ovviamente, l'affidabilità della correlazione, e, quindi, dell'indice costruito, sarà tanto maggiore quanto più saranno disponibili dati sperimentali in grande quantità. A tale fine il presente lavoro non può che essere concepito come un primo passo per ulteriori approfondimenti.

### 3 CASO STUDIO

Come caso studio, si presenta l'applicazione della metodologia alla sperimentazione su tavola vibrante effettuata sul prototipo di una delle 10 volte a crociera della moschea di Dey (Figura 1).



Figure 1. Una delle 10 volte a crociera presenti nella moschea di Dey, Algeri.

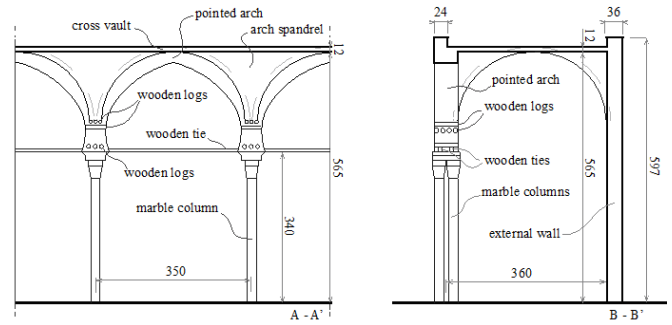


Figure 2. Geometria delle volte a crociera investigate.

La geometria della volta a crociera è illustrata in Figura 2. Il prototipo testato su tavola vibrante riproduce la parte alta della volta, senza le colonne sottostanti (Figura 3). È realizzata in mattoni con la stessa tecnica e gli stessi materiali del macroelemento reale. Le sue dimensioni alla base sono di  $350 \times 306 \text{ cm}^2$  con una altezza di 290 cm. Sono stati condotti recenti studi sulla moschea che hanno fornito un quadro particolareggiato delle condizioni strutturali della costruzione (Abdessemed-Foufa 2012, Abdessemed-Foufa et al. 2015). Per maggiori dettagli sulle caratteristiche strutturali e le proprietà dei materiali del prototipo si rimanda a Roselli et al. 2019. Il prototipo è stato testato inizialmente con due barre longitudinali in acciaio di collegamento tra i due muri trasversali, funzionanti da catene. Successivamente, le due catene sono state rimosse per verificare la resistenza del provino sino al collasso finale. La muratura storica algerina riprodotta per la realizzazione della volta è una muratura povera costituita da mattoni d'argilla cotta delle dimensioni di  $3.5 \times 12 \times 25 \text{ cm}^3$  con deboli giunti di malta dallo spessore di 2.5 cm. Test di caratterizzazione della malta sono stati eseguiti su sette campioni estratti da edifici della qasba di Algeri, antico quartiere della città fondato sulle rovine della vecchia *Icosium*.



Figure 3. Prototipo testato su tavola vibrante. I marcatori del sistema di *motion capture* 3D sono visibili in bianco.

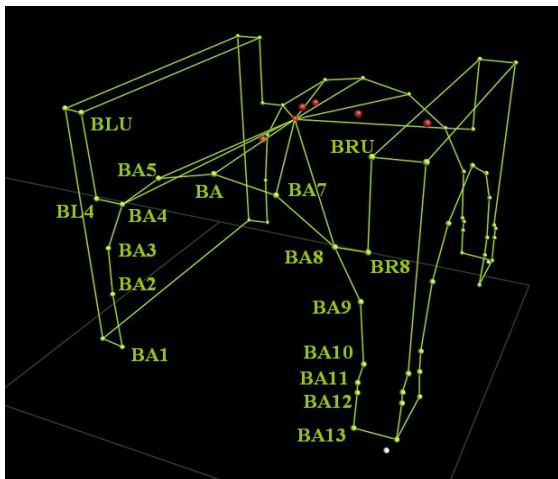


Figure 4. Ricostruzione 3D dei marcatori.

Si tratta di un labirinto di vicoli con case tradizionali e moschee, prevalentemente risalenti allo stesso periodo e realizzate con le stesse tecniche costruttive della moschea esaminata. I risultati delle analisi sulle malte hanno indicato che argilla, mattoni sminuzzati, ghiaia, sabbia, limo e pozzolana in varie proporzioni sono gli ingredienti principali. I mattoni sono stati posati in accordo con le tecniche degli antichi mastri, così come realizzavano le volte locali.

In Figura 3 si mostra il prototipo strumentato sulla tavola vibrante, in cui risaltano i 67 marcatori retroriflettenti del sistema *motion capture* 3D che brillano sotto il flash fotografico. Il sistema si compone di una costellazione di 10 telecamere al vicino infrarosso ad alta risoluzione e velocità, collocate nello spazio intorno alla tavola vibrante. In Figura 4 è visualizzata la ricostruzione della posizione 3D dei marcatori, ottenuta tramite l'applicazione di algoritmi di triangolazione geometrica sui dati acquisiti dalle telecamere. L'accuratezza del sistema è dell'ordine di 0.01-0.1 mm in termini di errore RMS sulla posizione dei marcatori (Roselli et al. 2015). I dati sono stati acquisiti alla velocità di 200 fps (corrispondente a una uguale frequenza di campionamento in Hz).

La sequenza sismica riprodotta dalla tavola vibrante si basa sulla componente NS della registrazione presso la stazione sismica di Keddara durante il terremoto del 21 maggio 2003 con epicentro nella provincia di Boumerdès a est di Algeri, con magnitudo di 6.8 Mw (Khellafi et al. 2013). Il segnale sismico è stato normalizzato al sito della qasba di Algeri secondo il metodo dello spettro a probabilità uniforme (UHRS) ed è stato applicato nella direzione trasversale alle catene. L'input sismico è stato scalato in intensità e somministrato in una sequenza sismica con step incrementali di 0.05g di accelerazione di picco nominale (PGA) fino al collasso della struttura testata. Nel corso della sequenza sono stati anche

eseguiti test intermedi con segnale di rumore bianco a bassa intensità (0.05g di PGA) per l'identificazione dinamica della struttura.

#### 4 RISULTATI

Nella Tabella 2 sono illustrati i risultati ottenuti con le varie funzioni di regressione utilizzati per la costruzione dell'indice di danno  $DI_m$  e relative correlazioni con l'indice  $DI_f$ , come definito dalla eq. 2.

Tabella 2. Correlazioni ottenute tra l'indice di danno  $DI_m$  e l'indice  $DI_f$  utilizzando differenti funzioni di regressione.

Funzioni per $DI_m$	Regressione	$R^2$
$a \log(\text{GRD}) + b$	$0.17 \log x + 0.78$	0.942
$a(\text{GRD}) + b$	$0.58 x + 0.26$	0.908
$a(\text{GRD})^b$	$0.78 x^{0.159}$	0.832
$a e^{b(\text{GRD})}$	$0.25 e^{1.29 x}$	0.754

I risultati migliori sono stati ottenuti con la funzione logaritmica, che ha mostrato una correlazione molto buona ( $R^2$  pari a 0.942) con  $DI_f$ . D'altra parte, si nota che tutte le funzioni provate hanno fornito correlazioni da buona a molto buone (con valori di  $R^2 > 0.75$ ), nonostante il contributo dell'assorbimento energetico sia stato trascurato. Bisogna anche rimarcare che la maggior parte dei punti sperimentali, ancorché pochi, sono concentrati a livelli bassi di danneggiamento ( $DI < 0.4$ ) come si può osservare in Figura 5.

Conseguentemente, l'equazione di regressione trovata non può essere considerata altamente rappresentativa di tutti gli stati di danneggiamento della struttura. Infatti, il prototipo testato è giunto rapidamente a collasso, in modo piuttosto improvviso e con poco preavviso, dopo il test a 0.25 g di PGA nominale, corrispondente a un'accelerazione di picco effettiva alla base della struttura di 0.318 g (PTA), mostrando un comportamento alquanto fragile. Comunque, la metodologia è sembrata efficace a cogliere il comportamento della struttura testata e di facile applicazione.

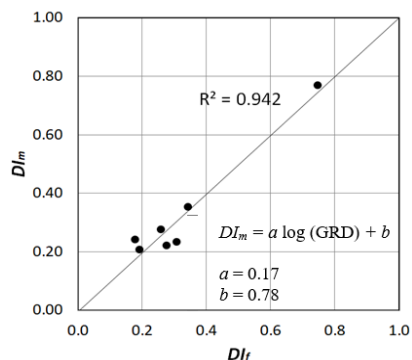


Figure 5. Correlazione empirica con funzione logaritmica tra  $DI_m$  e  $DI_f$  formulato secondo l'eq. 2.

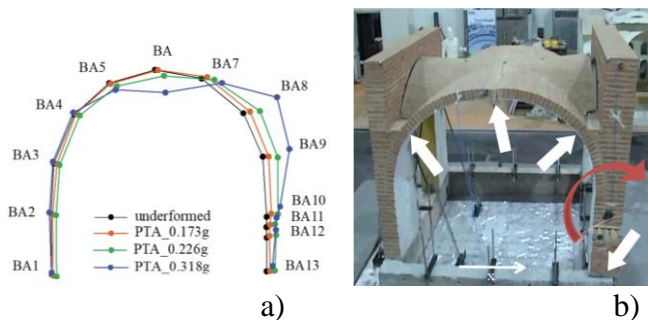


Figure 6. Deformazione della volta (vista laterale) descritta dagli spostamenti relativi dei marcatori, si riconosce l'evoluzione del meccanismo di collasso (a): ribaltamento incipiente fuori piano della facciata di destra e sviluppo delle quattro cerniere (freccie bianche) (b).

Attraverso la misura del moto dei marcatori è stato possibile identificare e seguire il meccanismo di collasso sin dalle deformazioni iniziali, ancora poco visibili a occhio nudo, verificatesi già nei primi step della sequenza sismica (Figura 6a).

Il ribaltamento fuori piano della facciata e il conseguente sviluppo di un meccanismo a quattro cerniere sulla volta (Figura 6b) ha portato al collasso catastrofico del provino. Il collasso finale è attivato al tempo 10 s della time history del test a 0.25 g di PGA nominale. Il tipico comportamento di una frattura che si genera tra due marcatori è quello mostrato in Figura 7a. Durante la scossa (condizioni dinamiche) la distanza  $\delta$  tra i due marcatori mostra dei picchi positivi generati dall'apertura e immediata chiusura della fessura. Di conseguenza, questi picchi possono essere utilizzati per rilevare anche le fessure capillari che si richiudono in condizioni statiche e sono, quindi, poco visibili nell'ispezione visiva che si effettua per il rilievo del quadro fessurativo. La eventuale apertura residua a fine test viene utilizzata per il calcolo di GRD e, quindi, dell'indice di danno  $DI_m$ . Ciò significa che un danneggiamento molto limitato, che porta a sole fessure capillari con apertura residua inferiore a 0.1 mm non viene rilevato.

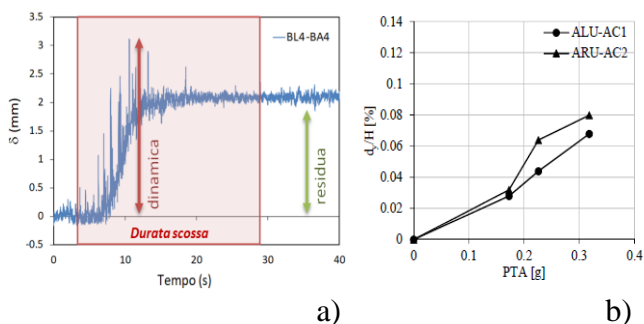


Figure 7. Andamento della distanza  $\delta$  tra i marcatori BL4 e BA4 durante test sismico a 0.2 g di PGA (a). Deformazioni di taglio nel piano ( $d_y/H$ ) tra gli spigoli sinistro (ALU-AC1) e destro (ACU-AC2) durante la sequenza di test sismici, con provino senza catene (b).

In Figura 7b si illustrano le deformazioni di taglio nel piano tra lo spigolo sinistro e quello destro della facciata, durante la sequenza di test sismici, con provino senza catene.

## 5 CONCLUSIONI

Nella presente memoria è stata esplorata la possibilità di valutare il danno di una struttura in muratura storica sottoposta a prove sismiche su tavola vibrante tramite un indice globale basato sulle misure di spostamento rilevate dai marcatori di un sistema optoelettronico 3D. La metodologia proposta sfrutta le potenzialità dell'uso di un sistema di *motion capture* in grado di una accuratezza dell'ordine di 0.1 mm su una grande quantità di punti di misura. Il vantaggio principale è quello di sviluppare un indice semplice, calcolabile direttamente dalle misure di spostamento relativo dei punti, e indipendente dalle condizioni al contorno, ovvero dai serraggio alla base del prototipo testato.

Una applicazione pratica al caso studio di una volta a crociera in scala reale ha mostrato le potenzialità della metodologia. I risultati ottenuti sono incoraggianti, nonostante l'indice proposto non consideri gli effetti legati alla dissipazione di energia nei cicli isteretici. Ulteriori sperimentazioni, che permettano la raccolta di una mole di dati sperimentali statisticamente rilevante, possono fornire un raffinamento e un miglioramento della formulazione dell'indice proposto. Ad esempio, si potrà studiare l'effetto dei diversi meccanismi di collasso che si attivano e l'influenza delle differenti tipologie strutturali.

## BIBLIOGRAFIA

- Abdessemed-Foufa, A., 2012. Visual screening for a potential evaluation of seismic vulnerability of historical building: Palace of the Dey (Citadel of Algiers). *WIT Transactions on The Built Environment*, **123**, 119-23.
- Abdessemed-Foufa, A., Terki, Y., Benouar, D., 2015. Case study: Local seismic culture in vernacular architecture in Algeria. *Seismic Retrofitting: Learning from Vernacular Architecture* (Correia, M.R., Lourenco, P.B., Varum, H., eds.), CRC Press, 101-102.
- 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), 53-71.
- DiPasquale, E., Ju, J.W., Askar, A., Çakmak, A.S., 1990. Relation between Global Damage Indices and Local Stiffness Degradation. *Journal of Structural Engineering*, **116**(5), 1440-56.
- Grünthal, G., 1998. European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). *Cahiers du Centre Européen de*

- Géodynamique et de Séismologie*, 15, Helfent-Betrance (Luxembourg).
- Hadzima-Nyarko, M., 2011. *Contribution to the research of seismic vulnerability of RC buildings*. Tesi di PhD, Facoltà di Ingegneria Civile, Università J.J. Strossmayer, Osijek (in Croato).
- Khellafi, A.M., Harichane, Z., Afra, H., Sadouki, A., 2013. A Case Study of Accelerometric Records Analysis of May 21st, 2003, Boumerdes (Algeria) Earthquake. *International Journal of Geotechnical Earthquake Engineering (IJGEE)*, 4(2), 34-52.
- Lagomarsino, S., Brencich, A., Bussolino, F., Moretti, A., Pagnini, L.C., Podestà, S., 1997. A new methodology for damage assessment on churches: first considerations on the mechanisms activated by the earthquake. *Ingegneria Sismica*, 3, 70-82.
- OPCM n. 28, 9 giugno 2017, "Modifiche all'ordinanza n. 19, 7 aprile 2017, recante 'Misure per il ripristino con miglioramento sismico e la ricostruzione di immobili ad uso abitativo gravemente danneggiati o distrutti dagli eventi sismici verificatisi a far data dal 24 agosto 2016'. Gazzetta Ufficiale, 143, 22 giugno 2017.
- Parisi, F., Augenti, N., 2013. Earthquake damages to cultural heritage constructions and simplified assessment of artworks. *Engineering Failure Analysis*, 34, 735-60.
- Park, Y.J., Ang, A.H.S., Wen, Y.K., 1984. Seismic damage analysis and damage-limiting design of RC buildings, *Structural Research Series*, 516, University of Illinois: Urbana, USA.
- Polimeno, M.R., Roselli, I., Luprano, V., Mongelli, M., Tatì, A., De Canio, G., 2018. A non-destructive testing methodology for damage assessment of reinforced concrete buildings after seismic events. *Engineering Structures*, 163, 122-36.
- Roselli, I., Mongelli, M., Tatì, A., De Canio, G., 2015. Analysis of 3D motion data from shaking table tests on a scaled model of Hagia Irene, Istanbul. *Key Engineering Materials*, 624, 66-73.
- Roselli, I., Paolini, D., Mongelli, M., De Canio, G., de Felice, G., 2017. Processing of 3D optical motion data of shaking table tests: filtering optimization and modal analysis. *6th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPdyn)*, 15-17 Giugno, Rodi, Grecia.
- Roselli, I., Fioriti, V., Mongelli, M., Colucci, A., De Canio, G., 2018. Machine Vision-Based Application to Structural Analysis in Seismic Testing by Shaking Table. *Optoelectronics in Machine Vision-Based Theories and Applications*, IGI Global ed.
- Roselli, I., De Canio, G., Rossi, M., Calderini, C., Lagomarsino, S., 2019. Relative displacements of 3D optical markers for deformations and crack monitoring of a masonry structure under shaking table tests. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements* (in stampa).
- Sinha, R., Shiradhonkar, R., 2012. Seismic damage index for classification of structural dam-age-closing the loop. *15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE)*, 24-28 Settembre, Lisbona, Portogallo.
- Williams, M.S., Sexsmith, R.G., 1995. Seismic Damage Indices for Concrete Structures: A State-of-the-Art Review. *Earthquake Spectra*, 11(2), 319-49.