

## SISTEMA RESTART PER LA RICOMPOSIZIONE AD ALTA PRECISIONE DI OPERE D'ARTE LAPIDEE FRAMMENTARIE

di Pietro Nardelli, Martina Pavan, Giulia Pompa, Silvia Borghini, Massimiliano Baldini, Alessandro Colucci, Vincenzo Fioriti, Alessandro Picca, Angelo Tati, Ivan Roselli

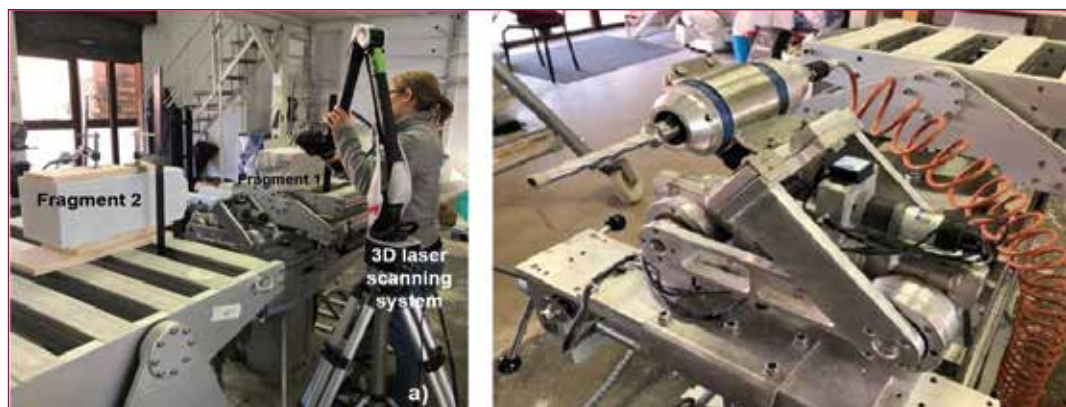


Fig. 1 - Scansione con braccio laser scanner 3D dei frammenti lapidei di un provino per la ricomposizione con il sistema RestArt (a). Dettaglio del trapano su bracci a controllo numerico(b).

L'innovativo metodo di ricomposizione di opere lapidee conservate in frammenti è stato messo a punto nell'ambito del progetto RestArt, co-finanziato dall'Unione Europea e dalla Regione Lazio. Il sistema permette tramite tecnologie di meccatronica e di ricostruzione virtuale 3D una precisione ed efficacia nella realizzazione degli imperniaggi molto maggiore rispetto ai metodi tradizionali usualmente impiegati.

Nel campo del restauro di manufatti antichi la possibilità di avere a disposizione metodi efficaci per riassemblare con elevata precisione opere d'arte frammentate è un tema di notevole rilevanza. In effetti, è un'esperienza molto comune, ad esempio negli scavi archeologici, ritrovare frammenti che appartengono a statue, elementi architettonici o manufatti antichi di vario genere, i quali non sempre sono di facile ricomposizione. Di recente, l'innovazione tecnologica nel rilievo 3D ad alta precisione e i progressi nella computer grafica permettono di eseguire delle ricostruzioni virtuali e una visualizzazione complessiva delle opere con grande efficacia (Papaioannou et al. 2017, Jo et al. 2020, Rasheed & Nordin 2020, Gherardini et al. 2018). Tuttavia, la ricomposizione dell'oggetto frammentato reale rimane spesso una sfida difficilissima per i restauratori. Certamente, questi ultimi si possono giovare della guida e del supporto delle innovazioni tecnologiche per la ricostruzione virtuale (Arbacea et al. 2013) e attraverso le loro competenze e la loro esperienza eseguire le operazioni pratiche di ricomposizione che a tutt'oggi sono prevalentemente di tipo manuale. Benché l'abilità anche manuale del restauratore è e rimane imprescindibile, si pongono dei problemi comunque molto rilevanti, soprattutto se i frammenti sono di notevole dimensione e di forma irregolare, non potendo essere più gestiti agevolmen-

te a mano. Nella gestione di queste situazioni si ricorre di solito a strutture e attrezzature che aiutano i restauratori nella movimentazione dei frammenti. A questo punto, l'innovazione tecnologica può dare un contributo anche in queste operazioni tramite l'impiego di macchinari opportunamente ideati e progettati, sfruttando la meccatronica di alta precisione basata su slitte e bracci robotici a controllo numerico integrati con accurati e versatili sistemi di rilievo 3D. Inoltre, nel caso di grandi opere lapidee la ricomposizione avviene attraverso la foratura della pietra e l'inserimento di appositi perni nei fori, operazione delicata, la cui massima precisione permette di risparmiare il più possibile quantità di materiale originario, nonché assicura la massima efficacia della tenuta dell'imperniaggio. Non meno importante è la definizione di una procedura complessiva di operazioni ben studiate per ottimizzare tutti i passaggi per portare a termine con successo il lavoro di restauro finale.

Questo è il caso della procedura sviluppata nel progetto RestArt, la quale integra l'utilizzo di un macchinario di alta precisione a controllo numerico con un sistema di scansione laser 3D avanzato. I macchinari e tutte le componenti accessorie che costituiscono il sistema RestArt sono stati inventati e progettati dall'arch. P. Nardelli, titolare di relativo brevetto in corso (Nardelli 2021).

La procedura complessiva, prima di essere utilizzata su opere d'arte originali, è stata sperimentata su provini fratturati in modo casuale nella parte centrale, a simulare due frammenti lapidei rappresentativi di statue o elementi architettonici antichi. Analoghi provini sono stati ricomposti con il metodo tradizionale usato come riferimento. I suddetti provini sono poi stati sottoposti a una serie di prove meccaniche di resistenza a vibrazione su tavola vibrante (Rossi et al. 2020). Le prove hanno riprodotto vibrazioni naturali (sismiche) o antropiche (dovute a mezzi di trasporto) a intensità crescente fino a livelli estremi, monitorando con diverse tipi di misure l'evoluzione dello stato di danneggiamento dei provini. In particolare, la risposta dei provini è stata valutata tramite l'analisi dei dati di vibrazione dei marcatori tracciati da un sistema opto-elettronico di visione 3D motion e con degli accelerometri (De Canio et al. 2016). In aggiunta, sono stati analizzati anche i filmati video delle vibrazioni con avanzate tecniche di elaborazione video derivate dal metodo del moto magnificato (Fioriti et al. 2018). Infine, sono stati eseguiti anche dei test con martello sonico (Polimeno et al. 2018) prima e dopo le vibrazioni su tavola vibrante al fine di verificare lo stato di integrità e il livello di danneggiamento dei provini. A seguito della validazione scientifica, che ha dimostrato la maggior efficacia del sistema RestArt rispetto al metodo tradizionale, sono stati realizzati con ottimi risultati restauri di opere d'arte antiche frammentate.

#### IL SISTEMA RESTART

Il sistema RestArt rappresenta un avanzamento tecnologico importante per il settore della conservazione dei beni culturali che, potendo garantire la massima precisione d'intervento, apporta maggiore sicurezza e rispetto per la materia originale. E' comunque importante sottolineare che la strumentazione robotica non vuole e non potrebbe in nessun caso sostituirsi al restauratore, che con la sua esperienza e sensibilità rimane l'ultimo artefice operativo di un intervento complesso e delicato come la ricomposizione di opere frammentate. Il sistema RestArt permette di movimentare e ricongiungere frammenti lapidei attraverso il riconoscimento preliminare delle interfacce ed attraverso l'uso di un sistema di foratura integrato può eseguire fori coassiali plurimi col minimo sacrificio di materia originale. Il macchinario è stato concepito e costruito per sostenere e movimentare pesi notevoli con una precisione al centesimo di millimetro. La sua efficacia è garantita da varie componenti innovative, quali: il sistema di raffreddamento delle punte speciali, il sistema di aspirazione delle polveri originali, il sistema di gestione per il riconoscimento delle interfacce e l'impennaggio, con precisione centesimale, attraverso fori plurimi, l'uso di uno scanner laser dalle elevate prestazioni.

La procedura è applicata da personale esperto e formato, a fronte di uno studio preliminare di fattibilità sulla base dello stato di conservazione dell'opera. I frammenti da ricomporre vengono posizionati sulle due piattaforme di supporto del macchinario e scansionati al fine di ottenere il riconoscimento delle interfacce (Figura 1a) e quindi il miglior riaccostamento grazie ai software di elaborazione dati. Tutte le movimentazioni sono controllate e memorizzate da un software dedicato, permettendo la ripetibilità di tutti i movimenti secondo le necessità.

Un sistema trapano solidale al macchinario (Figura 1b), realizza fori perfettamente coassiali su entrambe le facce dei frammenti da impennare e mantiene in memoria le coordinate di tutti i punti omologhi. I fori così realizzati sono perfettamente continui e dello stesso diametro consentendo l'inserimento perfetto anche di più perni di congiungimento: con 3 perni è possibile realizzare un piano reattivo che contrasta le



Fig. 2 - Esecuzione di un foro con punta speciale montata sul trapano integrato (a). Provini ricomposti pronti per i test di vibrazione su tavola vibrante (b).

forze di scorrimento e torsione, aumentando notevolmente la tenuta dell'impennaggio.

Il sistema di raffreddamento ad aria delle punte appositamente create per RestArt, consente di evitare il surriscaldamento delle parti in gioco. Questo sistema innovativo permette di ottimizzare il raffreddamento senza utilizzare acqua, accelerando i tempi ed eliminando il rischio di lavorazioni a secco. Il raffreddamento ad acqua infatti risulterebbe particolarmente rischioso nei frequenti casi di reperti con tracce di policromia.

L'uso di uno scanner laser 3D consente di eseguire il rilievo di precisione dei frammenti al fine di eseguire la ricostruzione virtuale dell'opera, la quale sarà alla base di raffinati calcoli per determinare i movimenti a controllo numerico, della macchina e del trapano, per la realizzazione dei fori per i perni e il riaccostamento dei frammenti.

#### SPERIMENTAZIONE

I provini su cui è stata eseguita la sperimentazione rappresentano una simulazione di opere lapidee fratturate, come ad esempio manufatti artistici o elementi architettonici rinvenuti già in stato di frammenti in uno scavo archeologico o danneggiati a seguito di eventi sismici, bellici, ecc. Sono stati scelti blocchi in travertino e in marmo, ciascuno dei quali è stato ridotto in due frammenti combacianti, inducendo una lesione con andamento del tutto casuale ma simile a ciò che accade nella realtà. L'obiettivo dei restauratori è stato quello di riprodurre artificialmente le stesse problematiche che

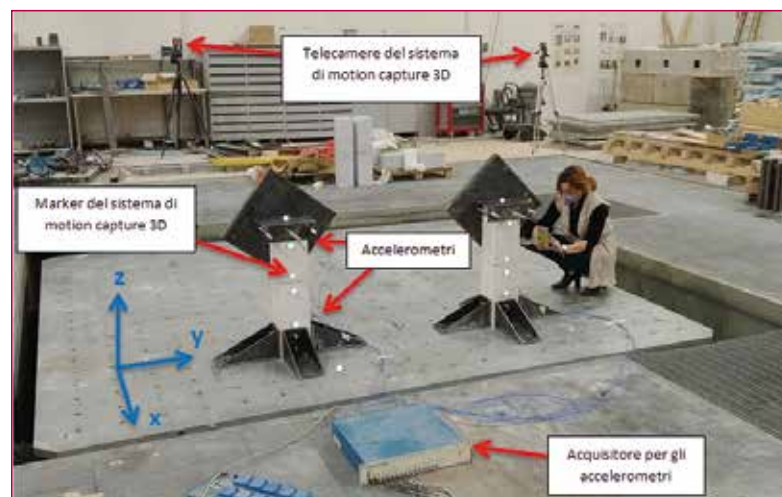


Fig. 3 - Allestimento della Prova 1 su tavola vibrante per il confronto della resistenza a vibrazione sismica dei provini T3T (sinistra), ricomposto con tecnica tradizionale, e T2R (destra), ricomposto con sistema RestArt.

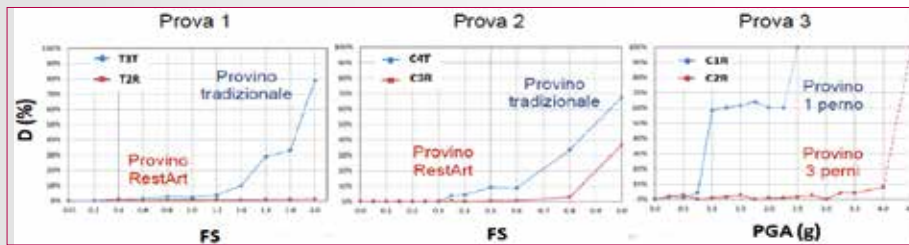


Fig. 4 - Evoluzione del danneggiamento (D %) dei provini sottoposti alle prove su tavola vibrante.

si trovano ad affrontare in questi casi. I provini scelti come oggetto della sperimentazione, sono 6 coppie di frammenti lapidei combacianti, con caratteristiche abbastanza simili, soprattutto in termini di carico, angolazione della frattura, piani di taglio.

Durante la fase di ricomposizione di ciascuna coppia di frammenti mediante i diversi sistemi di imperniaggio selezionati, sono emersi i vantaggi apportati dall'impiego di RestArt rispetto al metodo tradizionale. Innanzitutto, i tempi di realizzazione dei campioni eseguiti con RestArt sono stati decisamente più brevi rispetto a quelli dedicati alla preparazione e all'imperniaggio con il metodo tradizionale. Le piattaforme mobili consentono infatti una movimentazione facile e in sicurezza di entrambi i frammenti da ricomporre sino all'incollaggio finale, eliminando una fase lunga e complessa di allestimento e movimentazione dei frammenti.

Il sistema RestArt, gestito da un software dedicato e integrato con l'uso di un laser scanner abbate i tempi di ricerca dell'omologia dei punti e delle direzioni di foratura. I provini realizzati hanno dimostrato l'estrema precisione che ovviamente non può essere raggiunta con il metodo tradizionale basato sull'impiego di livelle laser che supportano il restauratore nel mantenere il trapano in una posizione di assialità durante la foratura.

I restauratori hanno ricomposto uno dei provini mediante ben 3 perni perfettamente paralleli, della stessa luce, grazie all'esecuzione di 3 fori coassiali. Ciò grazie alla straordinaria possibilità di mantenere in memoria tutti i movimenti che portano prima al riaccostamento dei frammenti e poi all'esecuzione di fori coassiali in punti omologhi con estrema precisione (Figura 2a).

La dimensione dei provini è (HxLxW) 800x180x180 mm. I provini per la sperimentazione sono stati ricomposti da MA.CO.RE. S.r.l. in collaborazione con l'Arch. Pietro Nardelli e il Museo Nazionale Romano (Laboratorio Grandi Marmi). I provini testati sono indicati come di seguito:

- T2R: provino in Travertino ricomposto con sistema RestArt con un perno;
- T3T: provino in Travertino ricomposto con sistema tradizionale con un perno;
- C1R and C3R: provini in marmo di Carrara ricomposti con sistema RestArt con un perno;
- C4T: provino in marmo di Carrara ricomposto con sistema tradizionale con un perno;
- C2R: provino in marmo di Carrara ricomposto con sistema RestArt con 3 perni.

Una volta pronti (Figura 2b), i provini sono stati trasportati al laboratorio delle tavole vibranti del Centro Ricerche ENEA Casaccia ed è stato eseguito il seguente programma di prove a vibrazione:

- Prova 1: T2R e T3T sono stati sottoposti a input sismico basato sulla registrazione del terremoto di Amatrice con fattori di scala FS della PGA (Peak Ground Acceleration) da 0.2 a 2.0;
- Prova 2: C4T e C3R sono stati sottoposti a vibrazione registrata su camion per trasporto merci alla velocità di circa

100 km/h su strada dissestata con buche, con fattori di scala FS della PGA da 0.1 a 1.0;

- Prova 3: C1R e C2R sono stati eccitati con terremoti sintetici caratterizzati da frequenze nell'intervallo 7-20Hz con durata 30 s e con PGA da 0.2 g a 4.5 g.

L'allestimento delle prove suddette (Figura 3) ha previsto il fissaggio alla base dei

provini sulla tavola vibrante, l'imposizione di una massa aggiuntiva eccentrica in testa che riproduce l'effetto di eventuali carichi sovrastanti (ad esempio, le gambe di una statua ecc.), e l'installazione di dispositivi e sensori per la misura delle vibrazioni (accelerometri e marcatori per l'acquisizione di un sistema di motion capture 3D). Attraverso l'analisi modale delle misure di vibrazione ricavate su vari punti di ogni provino in test di identificazione dinamica eseguiti dopo ogni test sismico è stato calcolato un indice di danno globale D basato sulla riduzione percentuale della frequenza fondamentale (Di Pasquale et al. 1990). Tale indice di danno si basa sulla semplice constatazione che la frequenza fondamentale di un corpo, in questo caso del provino testato, è tanto più alta quanto più il corpo è rigido. Ciò significa che a parità di condizioni ambientali, di carico e di vincolo, come nelle prove di laboratorio in ambiente controllato, il riscontro di una riduzione della frequenza fondamentale del provino non può che essere determinata da una perdita di rigidità dello stesso, il che si verifica per un cedimento della tenuta dell'imperniaggio e/o per un fenomeno di danneggiamento interno del materiale di cui è costituito il provino. In generale, i due fenomeni suddetti tendono ad avvenire entrambi contestualmente, con la prevalenza di uno o dell'altro. A seconda del meccanismo di rottura che si attiva e a seconda di quale è la parte debole, prevarrà lo sfilamento dell'imperniaggio o la fratturazione del materiale lapideo. In ogni caso, entrambi i fenomeni di danneggiamento portano a una riduzione della rigidità del provino e quindi D ne coglie bene il danneggiamento globale. Nel caso in cui il provino non mostri sfilamento dell'imperniaggio e distacco delle due parti ricomposte, lo stato di danneggiamento riscontrato da D è stato confermato dall'esito di prove non distruttive eseguite con martello sonico, metodo in grado di verificare l'integrità del materiale interno del provino.

## RISULTATI

I risultati delle prove su tavola vibrante sono rappresentati in Figura 4. Nella Prova 1 si è verificato che il provino T2R è rimasto sostanzialmente integro senza mostrare alcun danneggiamento di rilievo nel corso di tutta la sequenza di vibrazioni fino a FS pari a 2.0. Al contrario, nel provino T3T è apparso un danneggiamento significativo sin dal test a FS pari a 1.4, il quale è poi rapidamente peggiorato portando a raggiungere valori di D dell'80% alla fine della sessione. Analogamente, nella Prova 2 il provino C3R ha evidenziato solo un danneggiamento trascurabile fino all'ultimo test, nel quale il valore di D è salito al 37%, mentre il provino C4T ha iniziato a mostrare un certo danneggiamento sin dal test a FS pari a 0.35 e alla fine D è risultato pari a circa 70%, quasi il doppio del provino ricomposto con il metodo RestArt. Molto interessante è stato anche l'esito della Prova 3 in cui entrambi i provini erano stati ricomposti con il metodo RestArt. Qui quindi il confronto verteva a quantificare la maggiore efficacia che si può ottenere eseguendo l'imperniaggio a 3 perni, provino C2R, rispetto a quello con un solo perno, provino C1R. Il provino

C2R non ha mostrato nessun danno rilevante fino alla rottura improvvisa avvenuta soltanto al test a 4.5 g di PGA (Figura 5), mentre il provino C1R ha iniziato a manifestare un calo evidente della frequenza fondamentale da PGA pari a 1 g per poi arrivare a rottura finale a 2.5 g. Le prove non distruttive eseguite con martello sonico e le elaborazioni video derivate dal metodo del moto magnificato hanno sostanzialmente confermato l'entità del danneggiamento riscontrato tramite il calcolo dell'indice D.

## CONCLUSIONI

Un metodo innovativo per la ricomposizione di grandi frammenti lapidei basato su sistema meccatronico ad alta precisione integrato con rilievo da laser scanner 3D e algoritmi di ricostruzione virtuale è stato sviluppato e testato per aiutare i restauratori nell'opera di assemblaggio di grandi statue o elementi architettonici rinvenuti negli scavi archeologici o immagazzinati nei depositi museali. La sperimentazione su provini di grandi dimensioni in marmo e travertino sottoposti a vibrazioni estreme, sia di origine naturale (terremoti) che antropica (vibrazione da trasporto), hanno dimostrato la notevole efficacia del nuovo metodo, ampiamente maggiore rispetto alla tecnica tradizionale. I provini assemblati con il metodo RestArt si sono rivelati capaci di resistere a vibrazioni decisamente più forti già con l'impiego di un solo perno in virtù della migliore accuratezza dell'imperniaggio che assicura maggiore incastro dei frammenti e minore impiego di colle. Con l'utilizzo di 3 perni, cosa pressoché non praticabile con tecniche tradizionali, la tenuta meccanica dell'imperniaggio si è rivelata ulteriormente incrementata, tale da resistere a livelli di vibrazione notevolissimi (rottura a 4.5 g di PGA). Inoltre, il metodo RestArt ha consentito ai restauratori di eseguire l'intero lavoro con una procedura più agevole, sicura, accurata e in tempi minori rispetto alla tecnica tradizionale.

## RINGRAZIAMENTI

Il sistema descritto nel presente articolo è stato sviluppato nell'ambito del progetto RestArt, co-finanziato dalla EU e dalla Regione Lazio (bando POR FESR Lazio 2014-2020, Kets Tecnologie Abilitanti). Il sistema RestArt è stato ideato e progettato dall'arch. Pietro Nardelli. La validazione scientifica è stata curata da Enea presso il Centro di Ricerca Casaccia. I prototipi dei macchinari e delle strumentazioni accessorie costituenti il sistema RestART, nonché il braccio laser scanner 3D, sono di proprietà di MA.CO.RE'. s.r.l. Le statue ricomposte con il metodo RestArt sono esposte al Museo Pio Capponi di Terracina e al Museo Civico Archeologico di Anzio. Un ringraziamento speciale va alla Soprintendenza Archeologia Belle Arti Paesaggio delle Province di Frosinone e Latina e alla Soprintendenza Archeologia Belle Arti per l'area Metropolitana di Roma e per la Provincia di Rieti. La sperimentazione si è avvalsa anche della collaborazione del Laboratorio di Restauro Grandi Marmi di Museo Nazionale Romano e dell'Istituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro (ISCR).



Fig. 5 - Ispezione del provino C2R (ricomposto con sistema RestArt con 3 perni) dopo test di vibrazione a 4.5 g di PGA su tavola vibrante.

## BIBLIOGRAFIA

- Arbacea, L., Sonnino, E., Callieri, M., Dellepiane, M., Fabbri, M., Iaccarino Idelson, A. & Scopigno, R. (2013) Innovative uses of 3D digital technologies to assist the restoration of a fragmented terracotta statue. *J. Cult. Herit.* 14(4), 332-345.
- 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.
- Di Pasquale, 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.
- Fioriti, V., Roselli, I., Tati, A., Romano, R. & De Canio, G. (2018) Motion Magnification Analysis for Structural Monitoring of Ancient Constructions. *Measurement* 129, 375-380.
- Gherardini, F., Santachiara, M. & Leali, F. (2018) 3D Virtual Reconstruction and Augmented Reality Visualization of Damaged Stone Sculptures. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 364, 012004.
- Jo, Y. H., Hong, S., Jo, S. Y. & Yoon, M. K. (2020) Noncontact restoration of missing parts of stone Buddha statue based on three-dimensional virtual modeling and assembly simulation. *Herit. Sci.* 8(103).
- Nardelli, P. (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.
- Papaioannou, G., Schreck, T., Andreadis, A., Mavridis, P., Gregor, R., Vardis, K. & Sipiran, I. (2017) From Reassembly to Object Completion - A Complete Systems Pipeline. *ACM J. Comput. Cult. Herit.*, 10(2), Article 8.
- Polimeno, M. R., Roselli, I., Luprano, V., Mongelli, M., Tati, A. & De Canio, G. (2018) A non-destructive testing methodology for damage assessment of reinforced concrete buildings after seismic events. *Engineering Structures* 163, 122-136.
- Rasheed, N. A. & Nordin, M. J. (2020) Reconstruction algorithm for archaeological fragments using slope features. *ETRI Journal* 42(3), 420-432.
- Rossi, M., Calderini, C., Roselli, I., Mongelli, M., De Canio, G. & Lagomarsino, S. (2020) Seismic analysis of a masonry cross vault through shaking table tests: the case study of the Dey Mosque in Algiers. *Earthquakes and Structures* 18(1), 57-72.

## ABSTRACT

The RestArt method is an innovative mechatronic-based procedure, developed by the architect Nardelli, for high-precision reassembly of stone fragments intended to improve the restoration of ancient statues and architectural elements. The procedure comprises high-accuracy 3D laser scanning of two fragments positioned on the RestArt machine. After virtual reconstruction through best-fitting algorithms, the machine guides the drilling system for high-

precision rods insertion and moves one fragment to match the other one. The mechanical resistance of stone specimens reassembled by the RestArt and the traditional methods was tested by strong motion vibration experiments on shaking table.

## PAROLE CHIAVE

SISTEMA MECCATRONICO; RICOSTRUZIONE VIRTUALE 3D; RICOMPOSIZIONE FRAMMENTI LAPIDEI; RESTAURO GRANDI STATUE

## AUTORE

PIETRO NARDELLI  
P.NARDELLI@TICALI.IT  
ARCHITETTO  
VIA G. CALDERINI 68, ROMA  
MARTINA PAVAN  
GIULIA POMPA  
INFO@MACORE.IT  
MA.CO.RE'. S.R.L.  
VIA G. SEVERANO 35, 00161, ROMA,

SILVIA BORGHINI  
SILVIA.BORGHINI@BENICULTURALI.IT  
MUSEO NAZIONALE ROMANO  
LABORATORIO GRANDI MARMÌ, VIA E. DE NICOLA 70, ROMA  
MASSIMILIANO BALDINI, ALESSANDRO COLLUCCI, VINCENZO FIORITI, ALESSANDRO PICCA, ANGELO TATI, IVAN ROSELLI  
IVAN.ROSELLI@ENEA.IT  
ENEA, R.C. CASACCIA, VIA ANGUILLARESE 301, 00123, S. MARIA DI GALESTRIA, ROMA