

**I. ROSELLI, V. FIORITI, M. BALDINI,
A. COLUCCI, A. PICCA**

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Modelli e Tecnologie per la riduzione
degli impatti antropici e dei rischi naturali
Laboratorio Tecnologie per la Dinamica delle Strutture
e la PREvenzione del rischio sismico e idrogeologico
Centro Ricerche Casaccia, Roma

A. TATÌ

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Tecnologie e processi dei materiali per la sostenibilità
Laboratorio Materiali e Processi Chimico-Fisici
Centro Ricerche Casaccia, Roma

**VERIFICA SU TAVOLA VIBRANTE DEGLI EFFETTI
DELLE VIBRAZIONI SU FRAMMENTI LAPIDEI
RICOMPOSTI TRAMITE INNOVATIVO SISTEMA
MECCATRONICO SVILUPPATO NEL PROGETTO
RestArt**

RT/2021/2/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I. ROSELLI, V. FIORITI, M. BALDINI,
A. COLUCCI, A. PICCA

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Modelli e Tecnologie per la riduzione
degli impatti antropici e dei rischi naturali
Laboratorio Tecnologie per la Dinamica delle Strutture e la
PREvenzione del rischio sismico e idrogeologico
Centro Ricerche Casaccia, Roma

ANGELO TATÌ

Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali
Divisione Tecnologie e processi dei materiali per la sostenibilità
Laboratorio Materiali e Processi Chimico-Fisici
Centro Ricerche Casaccia, Roma

VERIFICA SU TAVOLA VIBRANTE DEGLI EFFETTI DELLE VIBRAZIONI SU FRAMMENTI LAPIDEI RICOMPOSTI TRAMITE INNOVATIVO SISTEMA MECCATRONICO SVILUPPATO NEL PROGETTO RestArt

RT/2021/2/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina www.enea.it

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

VERIFICA SU TAVOLA VIBRANTE DEGLI EFFETTI DELLE VIBRAZIONI SU FRAMMENTI LAPIDEI RICOMPOSTI TRAMITE INNOVATIVO SISTEMA MECCATRONICO SVILUPPATO NEL PROGETTO RestArt

I. Roselli, V. Fioriti , M. Baldini , A. Colucci , A. Picca , A. Tati

Riassunto

Nell'ambito del progetto RestArt finanziato su bando POR FESR 2014-2020, è stato sviluppato un innovativo metodo tramite sistema meccatronico per la ricomposizione di precisione di frammenti lapidei, tematica molto rilevante per il restauro di statue ed elementi architettonici antichi. Al fine di verificare l'efficacia dell'innovativo metodo di imperniaggio di precisione messo a punto ed ideato dall'Arch. P. M. Nardelli per Ma.Co.Rè. s.r.l., partner capofila del progetto RestArt, sono state svolte presso il C.R. ENEA Casaccia una serie di prove su tavola vibrante consistenti nell'applicare a provini rappresentativi di frammenti lapidei ricomposti (con il suddetto metodo innovativo e, per confronto, con la tecnica di imperniaggio tradizionale) delle vibrazioni a intensità estremamente elevata, riproducendo la vibrazione generata da terremoti estremi o da trasporti ad alta velocità su strada fortemente sconnessa.

Parole chiave: tavola vibrante, ricomposizione di statue, restauro, vibrazioni, sistema meccatronico.

Abstract

Within the framework of the RestArt project (funded by Lazio Region through the POR FESR 2014-2020 program), an innovative mechatronic-based method for the high-precision reassembling of stone fragments was developed, which is intended to give a substantial contribution to improve the restoration of ancient statues and architectural elements. The RestArt reassembling method was invented and designed by P. M. Nardelli for Ma.Co.Rè. s.r.l., coordinator of the project. In order to verify the efficiency of the new high-precision reassembling method a series of shaking table tests were carried out at ENEA Casaccia research center. The tested samples, comprising fragmented stone specimens reassembled by the new and the traditional methods, were subjected to extreme vibration inputs, such as strong motion earthquakes and high-speed wheeled transport on bumpy road.

Keywords: shaking table, statue reassembling, restoration, vibrations, mechatronic system.

Indice

1. Introduzione	7
2. Programma sperimentale	9
3. Allestimento delle prove sperimentali su tavola vibrante	11
4. Input di vibrazione utilizzati	15
4.1. Caratteristiche dell'input sismico naturale applicato	15
4.2. Caratteristiche dell'input da trasporto	17
4.3. Caratteristiche dell'input sismico sintetico applicato	18
4.4. Caratteristiche dell'input di caratterizzazione dinamica	20
5. Verifiche sperimentali.....	21
5.1. Fasi sperimentali	21
5.2. Esecuzione delle prove su tavola vibrante	22
5.3. Risultati delle misure di vibrazione	26
5.4. PnD con martello sonico	35
5.4.1. Strumentazione impiegata	35
5.4.2. Misure eseguite.....	35
5.5. Analisi di filmati video con tecnica derivata dal Moto Magnificato (MM)	43
5.5.1. Analisi delle basse frequenze ed alta intensità di sollecitazione	46
5.5.2. Analisi delle basse frequenze e bassa intensità di sollecitazione	49
5.5.3. Analisi delle medie frequenze e bassa intensità di sollecitazione	51
5.5.4. Analisi delle alte frequenze e bassa intensità di sollecitazione.....	51
6. Conclusioni	52

1. Introduzione

Nel seguente documento si descrive la sperimentazione su tavola vibrante e le relative misure eseguite presso il laboratorio del Centro Ricerche ENEA Casaccia nell'ambito dell'attività AT4.5 "Verifica degli imperniaggi dei frammenti riassembleati con l'ausilio dei macchinari del progetto RestArt tramite Indagini PnD e test su tavola vibrante degli effetti delle vibrazioni indotte da movimentazione e trasporto delle opere d'arte restaurate" del progetto RestArt finanziato su bando POR FESR 2014-2020 e coordinato dall'impresa di restauro Ma.Co.Rè. s.r.l. Il partenariato del progetto supporta l'arch. P. M. Nardelli in qualità di ideatore, inventore e progettista dei macchinari innovativi di imperniaggio dei frammenti.

Rispetto alle tipologie di vibrazioni inizialmente considerate sono stati studiati anche gli effetti delle vibrazioni indotte dagli eventi sismici, con particolare riferimento non tanto alle statue quanto piuttosto a elementi architettonici facenti parte di costruzione di interesse storico-monumentale e/o archeologico.

L'innovativo metodo di imperniaggio di precisione messo a punto ed ideato dall'Arch. P. M. Nardelli per Ma.Co.Rè. s.r.l., partner capofila del progetto RestArt, si basa sulla realizzazione di un innovativo sistema mecatronico a controllo numerico guidato secondo una procedura sviluppata nell'ambito del progetto con l'utilizzo di appositi software e sulla base di scansioni laser 3D dei frammenti da ricomporre. Il metodo di per sé non è oggetto del presente rapporto tecnico, né la descrizione dei software e del hardware sviluppato per eseguire la procedura innovativa di imperniaggio, ma si descriverà in questa sede esclusivamente la procedura di verifica dell'efficacia del metodo suddetto.

Al fine di verificare l'efficacia dell'innovativo metodo RestArt per la ricomposizione di frammenti lapidei nell'ambito del restauro di elementi architettonici e di statue, sono state eseguite da ENEA una serie di prove su tavola vibrante in cui sono stati testati dei provini rappresentativi di frammenti di statue o di elementi architettonici lapidei ricomposti con il suddetto metodo innovativo messi a confronto con corrispondenti provini ricomposti con la tecnica di imperniaggio tradizionale.

Più nello specifico, le prove su tavola vibrante consistono nell'applicare ai provini suddetti delle vibrazioni a intensità estremamente elevata (riproducendo la vibrazione generata da terremoti estremi o da trasporti su strada fortemente sconnessa ecc.). Tali prove

sperimentali sono state condotte aumentando gradualmente l'intensità della vibrazione fino alla rottura dei provini o alle capacità massime dell'impianto di prova.

Attraverso l'analisi di misure specificatamente allestite durante le suddette prove distruttive è stato possibile quantificare la maggiore resistenza alle sollecitazioni meccaniche di tipo vibrazionale dei provini ricomposti con il metodo innovativo in confronto alla tecnica tradizionale di imperniaggio. Inoltre, è stato possibile quantificare la maggiore resistenza dell'impennaggio eseguito con 3 perni invece che con un solo perno, il che è facile da realizzare con l'innovativo metodo RestArt mentre risulta estremamente complesso se non impossibile praticamente con le tecniche tradizionali.

2. Programma sperimentale

Il programma sperimentale è costituito sostanzialmente dalle prove di vibrazione su tavola vibrante, volte a verificare l'efficacia e la resistenza a vibrazione degli imperniaggi per la ricomposizione di frammenti lapidei di statue o di elementi architettonici con il metodo sviluppato e messo a punto nel progetto RestArt. Associate alle suddette prove e a corredo delle stesse, sono state eseguite una serie di misure che sono descritte nel capitolo 5.

Al fine di realizzare il suddetto programma sono stati testati dei provini, per semplicità di forma parallelepipedica, fratturati a metà altezza e ricomposti con il metodo innovativo RestArt e con il metodo tradizionale a fine di compararne i risultati.

Il programma sperimentale è suddiviso in tre batterie di test:

- PROVA 1 (input sismico naturale):
 - n. 1 provino di travertino con 1 perno con metodo RestArt
 - n. 1 provino di travertino con 1 perno con metodo tradizionale

- PROVA 2 (input da trasporto):
 - n. 1 provino di marmo con 1 perno con metodo RestArt
 - n. 1 provino di marmo con 1 perno con metodo tradizionale

- PROVA 3 (input sismico sintetico):
 - n. 1 provino di marmo con 1 perno con metodo RestArt
 - n. 1 provino di marmo con 3 perni con metodo RestArt

La PROVA 1 verificherà il comportamento dell'imperniaggio RestArt in confronto a quello tradizionale su provini in travertino, materiale molto usato per la realizzazione di edifici storici, sottoposti a vibrazione tipicamente generata da un terremoto.

La PROVA 2 verificherà il comportamento dell'imperniaggio RestArt in confronto a quello tradizionale su provini in marmo, materiale molto usato nella realizzazione delle statue antiche, sottoposti a vibrazione tipicamente generata da un mezzo di trasporto su gomma per il trasferimento di oggetti e merci.

La PROVA 3 verificherà il vantaggio ottenibile con l'impenniaggio RestArt con 3 perni rispetto a quello con un solo perno. Data l'elevata resistenza prevista da questi provini sarà utilizzato un input sismico sintetico, ovvero un terremoto artificiale, di caratteristiche tali da essere particolarmente gravoso per i provini sottoposti a test.

3. Allestimento delle prove sperimentali su tavola vibrante

Nelle figure di seguito si illustra l'allestimento di una batteria di prova su tavola vibrante. In ogni batteria di prova sono testati contemporaneamente due provini, le cui dimensioni sono mostrate in Figura 1a. Il fissaggio di ogni provino alla tavola vibrante è ottenuto tramite 4 staffe d'acciaio appositamente realizzate per adeguarsi alla maschera di foratura della tavola vibrante (Figura 1b, dove si evidenzia anche la posizione dei punti di misura strumentati con i marker del sistema di motion capture 3D e gli accelerometri triassiali). A entrambi i provini sono, inoltre, fissate da un lato una o più piastre d'acciaio di dimensioni 50 x 50 cm di 100 kg di peso (in Figura 2 nelle viste laterali e in Figura 3 in vista prospettica), a riprodurre l'affetto di una massa aggiuntiva eccentrica, per riprodurre una situazione particolarmente onerosa per la tenuta dell'imperniaggio, a simulare l'effetto della continuazione di una statua o di un carico sovrastante che verte sul pilastro di appoggio. Per il fissaggio della massa aggiuntiva viene montato in testa a ogni provino un cappello d'acciaio appositamente realizzato con elementi di carpenteria metallica imbullonati con barre filettate.

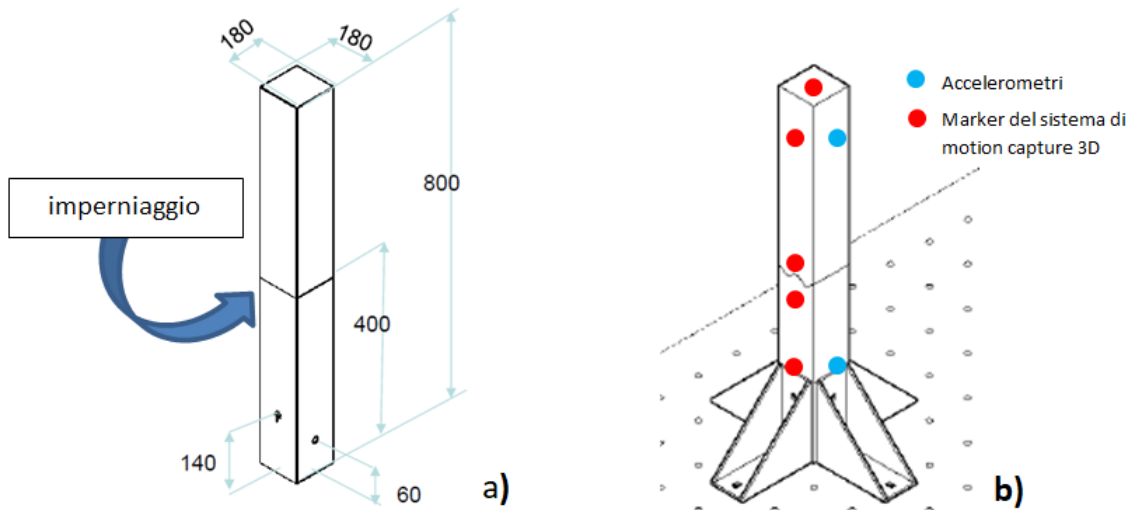


Figura 1. Dimensioni in mm dei provini (a) e fissaggio alla tavola vibrante con schema della posizione dei punti di misura (b).

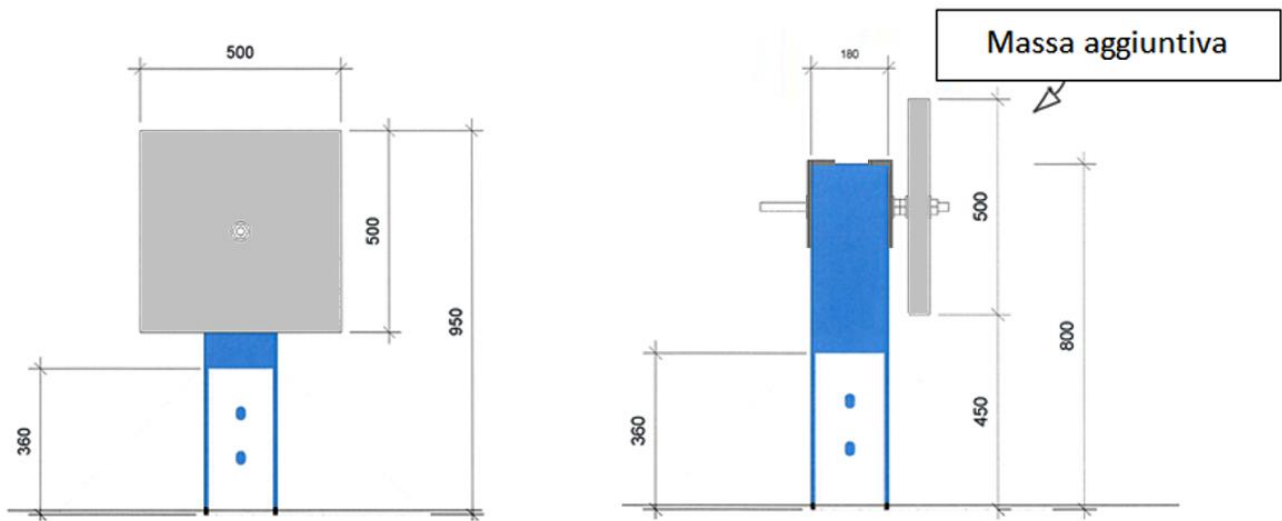


Figura 2. Viste laterali della disposizione dei due provini (in blu) da testare in una batteria di prova.

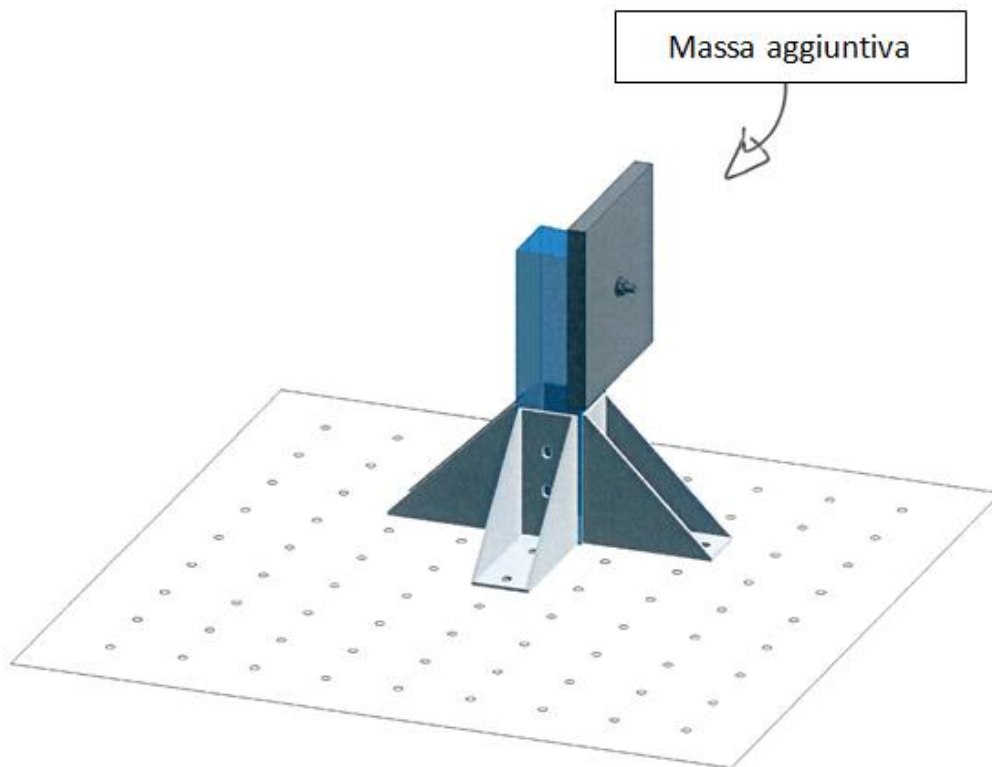


Figura 3. Vista prospettica dell'allestimento di un provino (in blu) da testare in una batteria di prova.

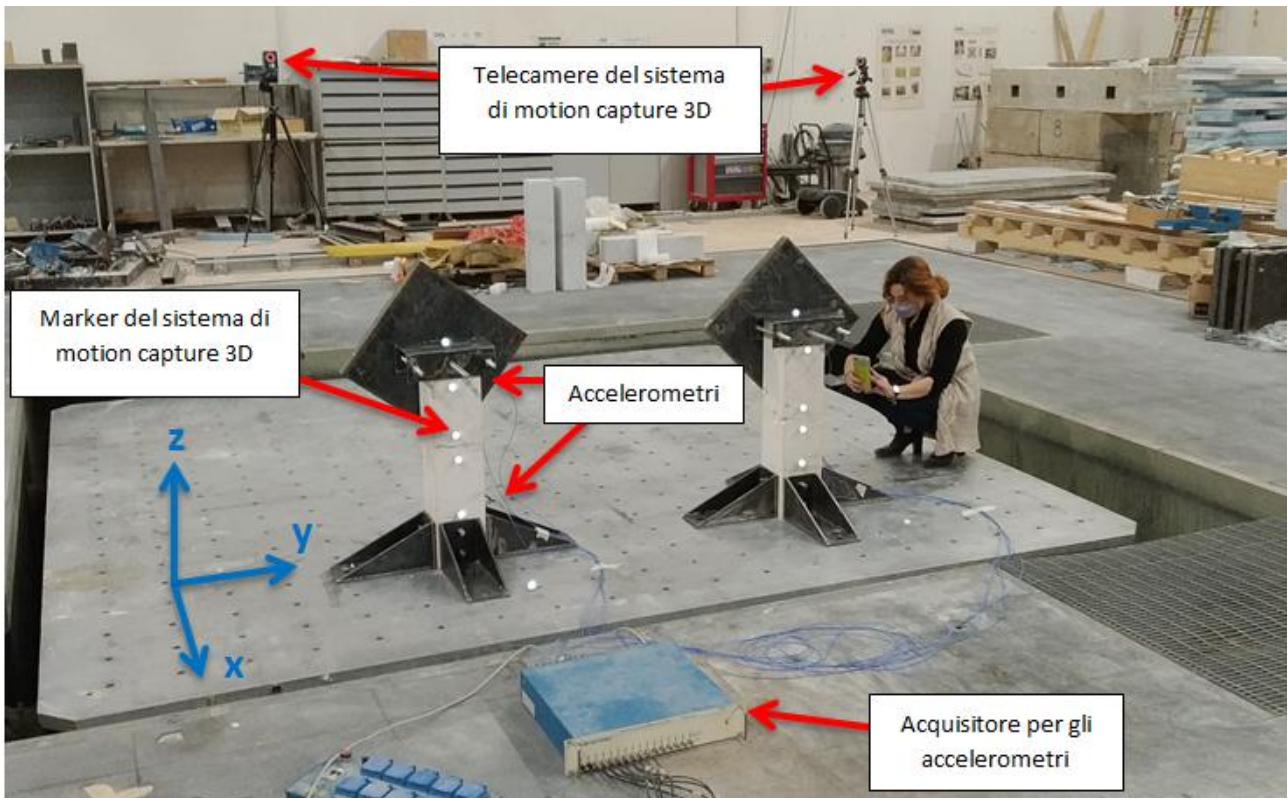


Figura 4. Disposizione sulla tavola vibrante di due provini da testare in una batteria di prova e posizione della sensoristica (sistema di motion capture 3D e accelerometri).

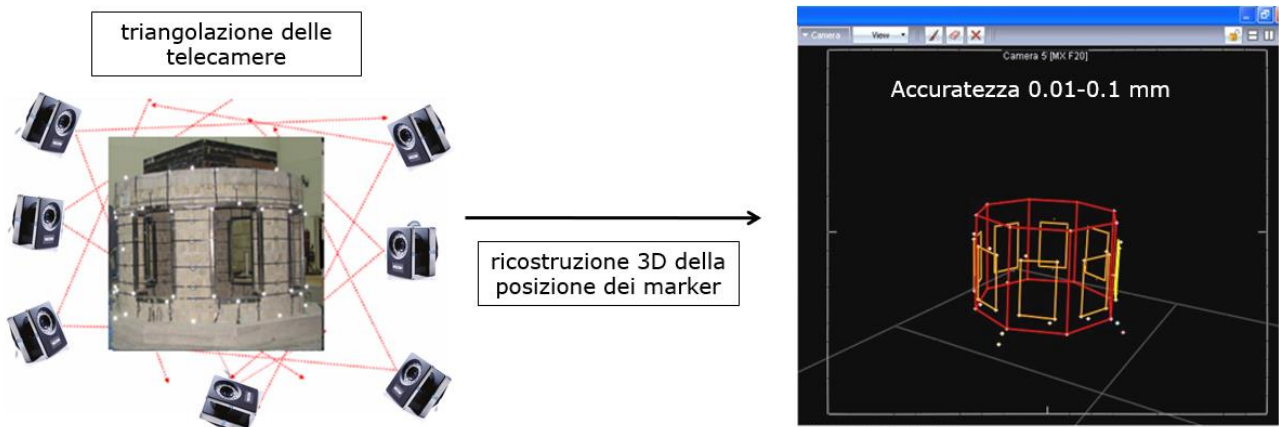


Figura 5. Schema di funzionamento del sistema di motion capture 3D, denominato 3DVision, per la misura degli spostamenti dei marker (punti in bianco sulla struttura a destra).

I provini sono disposti sulla tavola vibrante come mostrato in Figura 4. Intorno alla tavola vibrante sono posizionate opportunamente le telecamere del sistema di motion capture 3D, denominato 3DVision, per la misura degli spostamenti dei marker, il cui schema di

funzionamento è illustrato in Figura 5. In Figura 6 un dettaglio degli accelerometri triassiali installati su un provino.

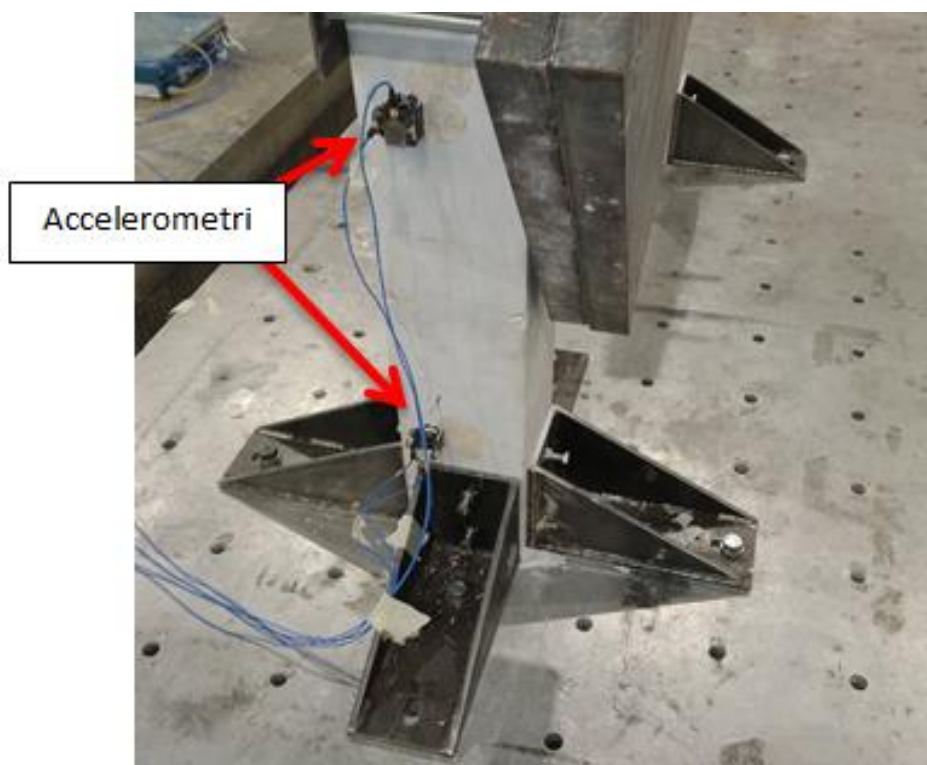


Figura 6. Dettaglio dei canali accelerometrici installati su un provino.

4. Input di vibrazione utilizzati

4.1. Caratteristiche dell'input sismico naturale applicato

L'input sismico di base è costituito dalla registrazione della stazione sismica AMT, situata presso Amatrice della scossa avvenuta in 30/10/2016, la scossa di maggiore magnitudo della sequenza sismica dell'Italia Centrale del 2016-2017. Questo input viene utilizzato per eseguire la PROVA 1. Scalato in intensità, l'accelerogramma viene fornito alla tavola vibrante come input a partire da una accelerazione massima, o PGA (Peak Ground Acceleration), a bassa intensità pari al 20% del segnale originario. A ogni step successivo della sequenza di prova l'input viene incrementato del 20% fino a rottura del provino o al raggiungimento del limite tecnico della macchina di prova. Di seguito i dati tecnici, gli spettri (Figura 7) e le componenti dell'accelerogramma (Figure 8-10) dell'input sismico di base impiegato nelle prove su tavola vibrante.

Dati tecnici del sisma preso a riferimento: Codice stazione AMT, data evento 2016-10-30, ore 06:40:18.

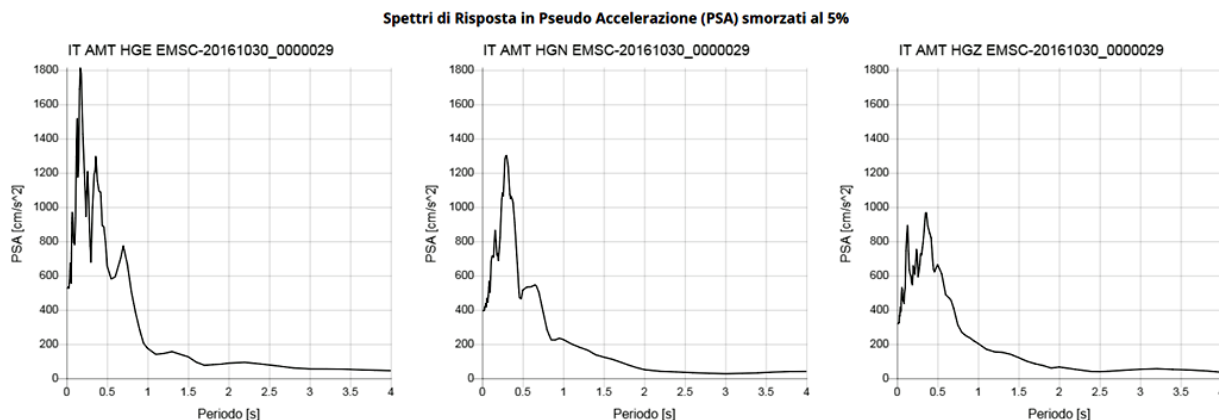


Figura 7. Spettri di risposta dell'input sismico AMT.

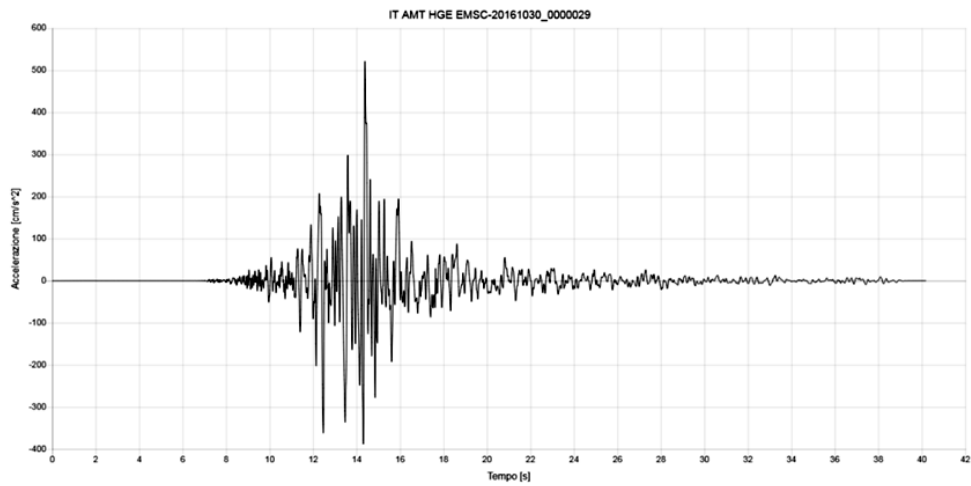


Figura 8. Componente orizzontale in direzione EST dell'accelerogramma dell'input sismico AMT.

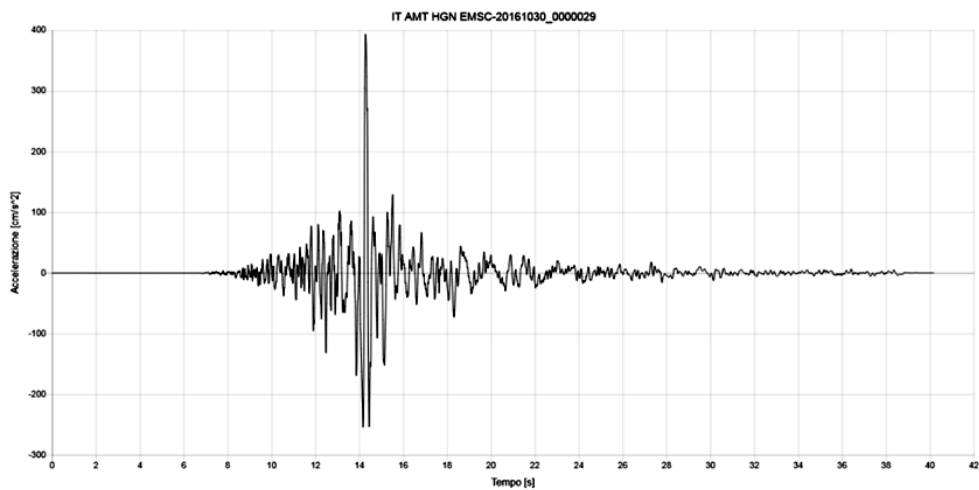


Figura 9. Componente orizzontale in direzione NORTH dell'accelerogramma dell'input sismico AMT.

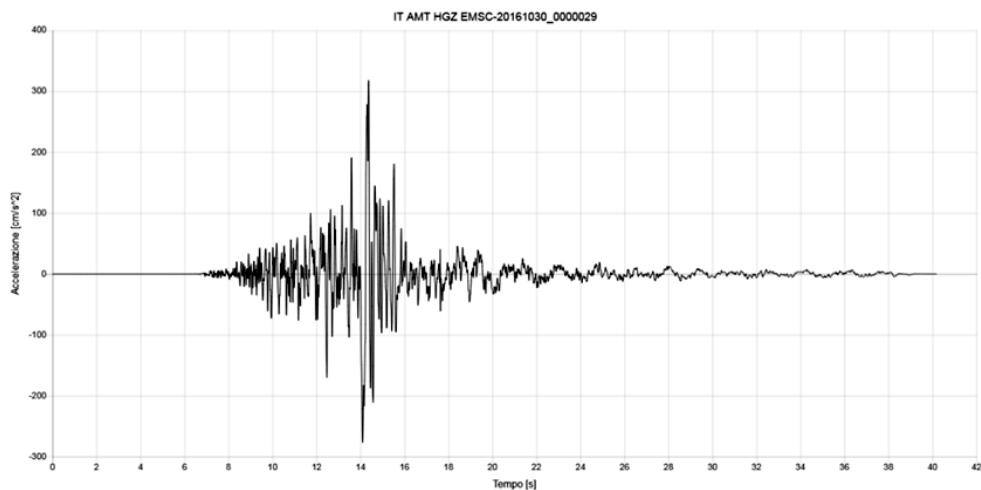


Figura 10. Componente orizzontale in direzione Z dell'accelerogramma dell'input sismico AMT.

4.2. Caratteristiche dell'input da trasporto

L'input da trasporto si basa su una effettiva registrazione (Figura 11) della vibrazione a bordo del cassone di un furgone per il trasporto di merci di tipo Iveco Daily, uno dei mezzi commerciali più comuni in circolazione (Figura 12). La vibrazione registrata comprende il passaggio su una buca a velocità sostenuta (circa 100 km/h) per riprodurre delle condizioni di marcia piuttosto onerose per il contenuto del cassone. A partire da tale registrazione si genera un input della durata di 2 min comprendente un evento di buca ogni 10 s. Questo input viene utilizzato per eseguire la PROVA 2. Similmente all'input sismico, anche questo input viene fornito alla tavola vibrante scalato, sempre partendo da bassa intensità (5% dell'intensità originaria). A ogni step successivo della sequenza di prova l'input viene incrementato fino a rottura del provino o al raggiungimento del limite tecnico della macchina di prova.

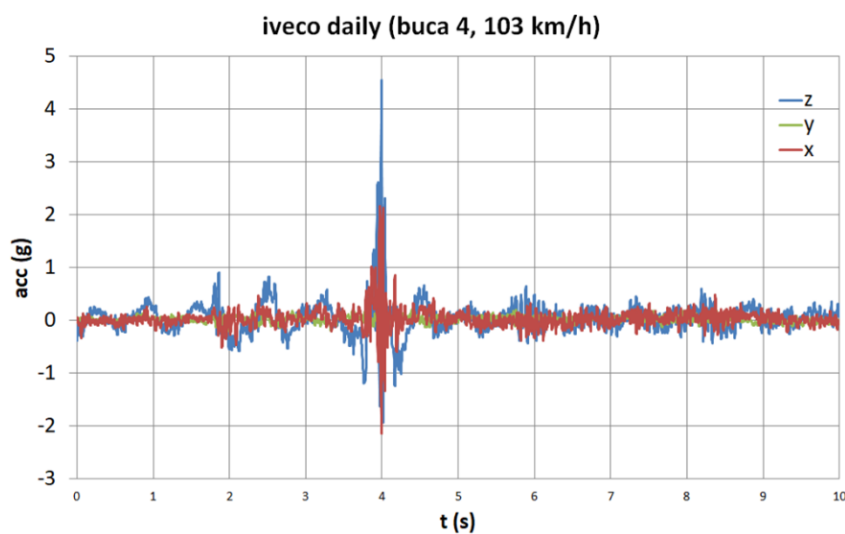


Figura 11. Registrazione della vibrazione a bordo del cassone di un furgone per trasporto merci usato come input di base per la vibrazione da trasporto.



Figura 12. Furgone per trasporto merci del tipo considerato per la definizione dell'input da trasporto per le statue nel presente studio.

4.3. Caratteristiche dell'input sismico sintetico applicato

L'input sismico sintetico è una vibrazione simile a un terremoto naturale, ma che ha delle caratteristiche specifiche che si possono progettare appositamente per ottenere una eccitazione vibrazionale voluta a priori. Questa tecnica viene utilizzata principalmente da normative e standard internazionali che regolano i test di verifica a vibrazione di oggetti che devono superare requisiti di massima sicurezza particolarmente onerosi, come nell'ambito militare o per i componenti di impianti nucleari. Questo input è stato utilizzato per eseguire la PROVA 3, in quanto in questa batteria di test sono stati verificati i provini che si preveda essere più resistenti. Nel caso specifico dei test eseguiti nell'ambito del progetto RestArt, è stato costruito un input sismico sintetico tale che abbia un contenuto in frequenza particolarmente gravoso per i provini sottoposti a test, ovvero con massima energia nel range di frequenza 5-20 Hz (Figura 13), ovvero il range di frequenze caratteristico dei provini da testare, sulla base di stime in accordo a quanto riscontrato dalle precedenti PROVA 1 e PROVA 2. La durata di questo segnale vibrazionale è sostanzialmente di 35 s. Nelle Figure 14-16 si mostrano le componenti nelle varie direzioni dell'input sismico sintetico con PGA di 1 g in direzione orizzontale. Similarmente all'input sismico, anche questo input viene fornito alla tavola vibrante scalato, sempre partendo da bassa intensità, cominciando da un intensità di 0.25g di PGA (Peak Ground Acceleration), ovvero la massima accelerazione del segnale. Anche qui, a ogni step successivo della sequenza di prova l'input viene incrementato fino a rottura del provino o al raggiungimento del limite tecnico della macchina di prova.

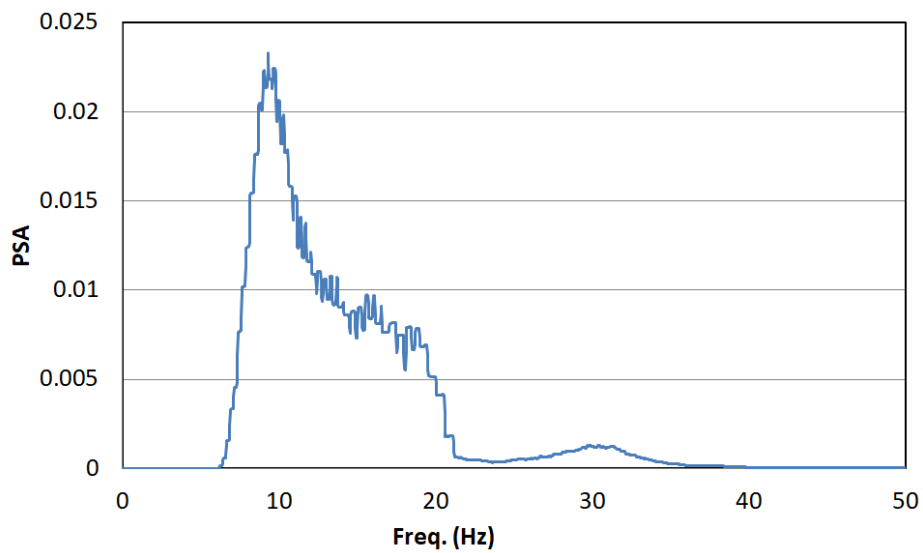


Figura 13. Spettro di risposta dell'input sismico sintetico utilizzato.

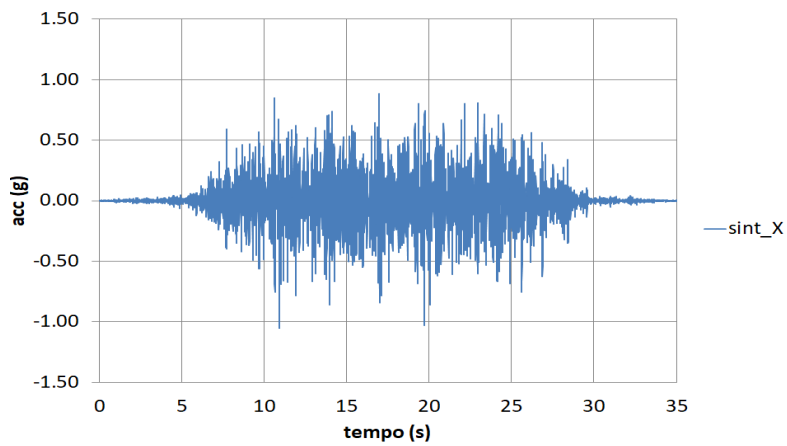


Figura 14. Componente orizzontale in direzione x dell'accelerogramma dell'input sismico sintetico.

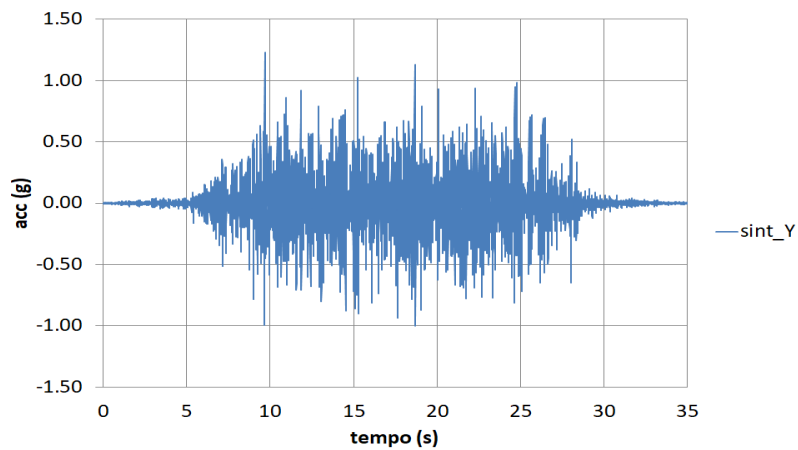


Figura 15. Componente orizzontale in direzione y dell'accelerogramma dell'input sismico sintetico.

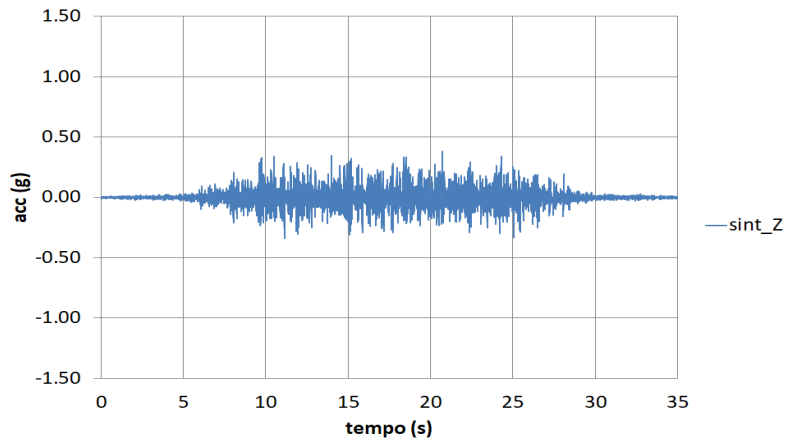


Figura 16. Componente orizzontale in direzione z dell'accelerogramma dell'input sismico sintetico.

4.4. Caratteristiche dell'input di caratterizzazione dinamica

L'input usato per la caratterizzazione dinamica dei provini sottoposti a test di vibrazione su tavola vibrante è costituito da una vibrazione a bassa intensità, tale da non danneggiare i provini (0.05 g di PGA), dotato di uno spettro piatto, ovvero un rumore bianco (Figura 17). Tale input viene anche detto random, in quanto costituisce una vibrazione tipicamente generata da sorgenti casuali che si possono trovare nell'ambiente nei pressi dell'oggetto sollecitato, riproducendo così le condizioni tipiche di una vibrazione ambientale. Dall'analisi con opportune procedure delle misure eseguite in questo tipo di test si può verificare l'evoluzione dello stato di danneggiamento degli oggetti sottoposti alla sperimentazione. Ogni test di tipo sismico o da trasporto sarà intervallato nella sequenza di prova da un test di questo tipo per verificare lo stato di danneggiamento e la sua evoluzione nel procedere della sperimentazione.

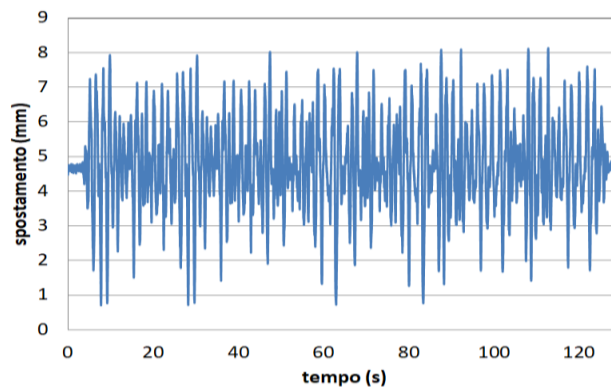


Figura 17. Vibrazione di tipo random eseguita come test di caratterizzazione dinamica nella sperimentazione su tavola vibrante.

5. Verifiche sperimentali

Le misure eseguite nel corso della sperimentazione su tavola vibrante (Figura 18) sono costituite da:

- Misure di vibrazione tramite accelerometri e tramite sistema di motion capture 3D in dotazione al laboratorio, denominato 3DVision, per analizzare le accelerazioni e gli spostamenti dei provini, nonché per analizzarne l'evoluzione del danneggiamento;
- Analisi di filmati video tramite elaborazioni derivate dalla tecnica del Moto Magnificato (MM), per analizzare il comportamento dinamico dei provini;
- Prove non Distruttive (PnD) con martello sonico prima e dopo i test su tavola vibrante per verificare lo stato di integrità interna dei provini.



Figura 18. Area sperimentale predisposta presso i laboratori ENEA del C.R. Casaccia per le verifiche sperimentali su tavola vibrante con l'allestimento dei provini per le prove.

5.1. Fasi sperimentali

Le fasi sperimentali eseguite al fine di verificare le prestazioni sotto vibrazione dei provini riassemblati con il metodo RestArt e con il metodo tradizionale si possono riassumere come segue:

- Misure PnD con martello sonico sui provini prima della partenza dal laboratorio di Ma.Co.Rè. e poi all'arrivo presso il laboratorio ENEA del C.R. Casaccia, al fine di verificare che il trasporto dei provini non ne abbia compromesso l'integrità;
- Esecuzione delle prove distruttive su tavola vibrante secondo il programma sperimentale suddiviso in tre batterie di test PROVA 1, PROVA 2 e PROVA 3, come descritto nel capitolo 2. In ogni batteria di test suddetta si procede fino a danneggiamento dei provini o al limite fisico di funzionamento della tavola;
- Misure PnD sui provini a conclusione delle prove distruttive su tavola vibrante, se pertinente, ovvero sui provini in cui l'imperniaggio non è arrivato a rottura totale, per verificarne il grado di danneggiamento.

5.2. Esecuzione delle prove su tavola vibrante

La PROVA 1 è stata eseguita il giorno 26 ottobre 2020. Due provini di travertino con 1 perno realizzati uno con metodo RestArt (codice T2R) e uno con metodo tradizionale (codice T3T) sono stati sottoposti alle prove su tavola vibrante con input sismico naturale come descritto nel precedente paragrafo 4.1. Nella seguente tabella 1 è riportata la sequenza dei test con i valori dei fattori di scala (FS) applicati all'input sismico di base. I fattori di scala vanno intesi come coefficiente moltiplicativo dell'accelerazione. I provini sono stati caricati con una massa aggiuntiva costituita da una piastra da 100 kg l'una, come si evidenzia in Figura 19.

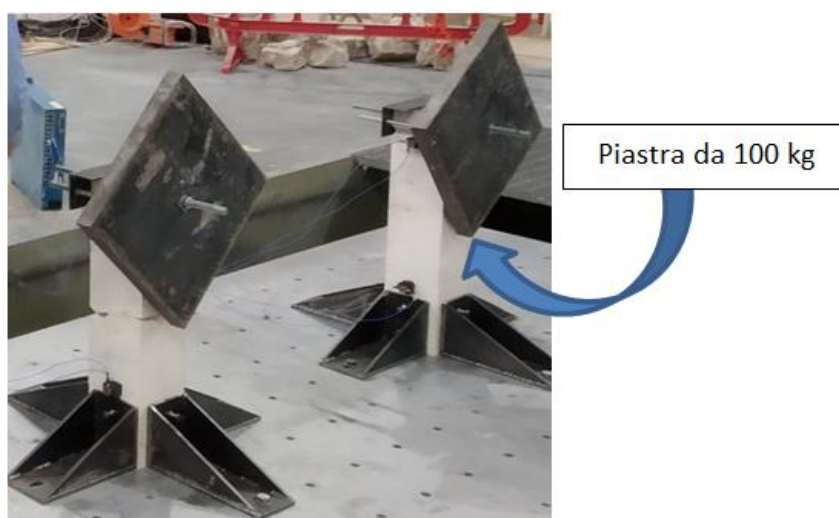


Figura 19. Allestimento dei provini per la PROVA 1 con una piastra da 100 kg.

Tabella 1. Sequenza dei test sismici eseguiti nella PROVA 1 con relativi fattori di scala (FS) e PGA nominali.

test	FS	PGA (g)
1	0.0	0.00
2	0.2	0.10
3	0.4	0.20
4	0.6	0.30
5	0.8	0.40
6	1.0	0.50
7	1.2	0.60
8	1.4	0.70
9	1.6	0.80
10	1.8	0.90
11	2.0	1.00

La PROVA 2 è stata eseguita il giorno 27 ottobre 2020. Due provini di marmo con 1 perno realizzati uno con metodo RestArt (codice C3R) e uno con metodo tradizionale (codice C4T) sono stati sottoposti alle prove su tavola vibrante con input da trasporto come descritto nel precedente paragrafo 4.2. Nella seguente tabella 2 è riportata la sequenza dei test con i valori dei fattori di scala (FS) applicati all'input di base. I fattori di scala vanno intesi come coefficiente moltiplicativo dell'accelerazione. La sequenza (Tabella 2) si conclude al raggiungimento dei limiti fisici dell'impianto della tavola vibrante di procedere con test di intensità superiore (5 g di accelerazione max). I provini sono stati caricati con una massa aggiuntiva costituita da due piastre da 100 kg l'una (Figura 20). La massa aggiuntiva viene aumentata rispetto alla PROVA 1 in quanto l'input di trasporto, per quanto molto oneroso, è strutturalmente meno impegnativo rispetto al test sismico per la configurazione di test adottata.

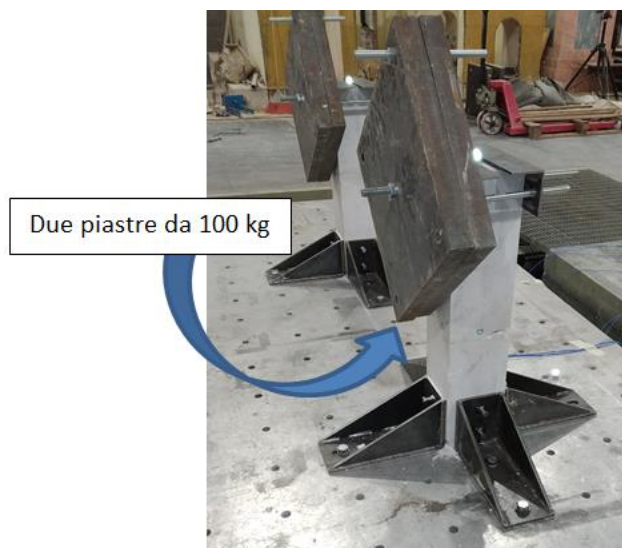


Figura 20. Allestimento dei provini per la PROVA 2 con due piastre da 100 kg.

Tabella 2. Sequenza dei test sismici eseguiti nella PROVA 2 con relativi fattori di scala (FS) e PGA nominali.

test	FS	PGA (g)
1	0.00	0.00
2	0.05	0.20
3	0.10	0.50
4	0.15	0.70
5	0.20	1.00
6	0.25	1.20
7	0.30	1.40
8	0.35	1.70
9	0.40	1.90
10	0.50	2.40
11	0.60	2.90
12	0.80	3.80
13	1.00	4.80

La PROVA 3 è stata eseguita il giorno 28 ottobre 2020. Due provini di marmo realizzati entrambi con metodo RestArt, ma uno con 1 perno (codice C1R) e l'altro con 3 perni (codice C2R) sono stati sottoposti alle prove su tavola vibrante con input sismico sintetico come descritto nel precedente paragrafo 4.3. Nella seguente tabella 2 è riportata la sequenza dei test con i valori dei fattori di scala (FS) applicati all'input di base. Non esistendo in questo caso un input reale da riferimento non si parla qui di fattori di scala che non avrebbero senso e si fa riferimento direttamente alla PGA nominale in direzione orizzontale con cui viene costruito il sisma sintetico. La sequenza (Tabella 3) si conclude

al raggiungimento della rottura completa dell'imperniaggio di entrambi i provini testati. I provini sono stati caricati con una massa aggiuntiva costituita da tre piastre da 100 kg l'una (Figura 21). La massa aggiuntiva viene ulteriormente aumentata rispetto alla PROVA 1 in quanto il provino con 3 perni si prevede essere molto più resistente.

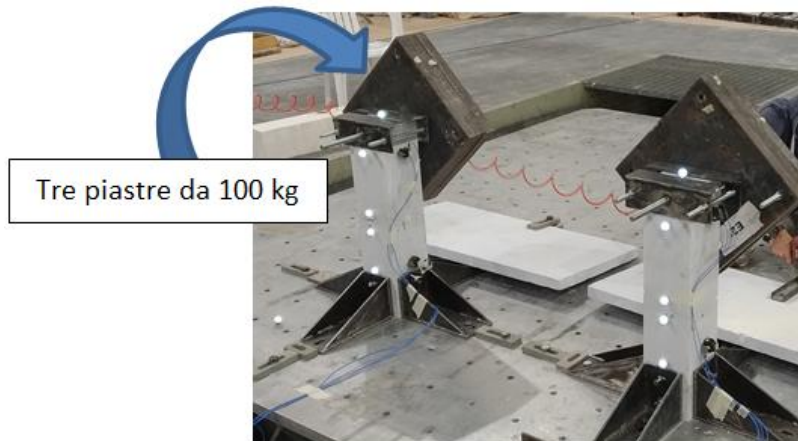


Figura 21. Allestimento dei provini per la PROVA 3 con tre piastre da 100 kg.

Tabella 3. Sequenza dei test sismici eseguiti nella PROVA 3 con relativi valori PGA nominali in orizzontale.

test	PGA (g)
1	0.00
2	0.25
3	0.50
4	0.75
5	1.00
6	1.25
7	1.50
8	1.75
9	2.00
10	2.25
11	2.50
12	2.75
13	3.00
14	3.25
15	3.50
16	4.00
17	4.50

5.3. Risultati delle misure di vibrazione

Al fine di quantificare il livello di danneggiamento dei provini sottoposti a test su tavola vibrante si è utilizzato un indice di danno D basato sul confronto tra la frequenza fondamentale di oscillazione del provino nelle condizioni iniziali prima dei test con la frequenza fondamentale riscontrata dopo l'esecuzione di ogni test di vibrazione. Nello specifico l'indice di danno D è definito dalla seguente equazione:

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

dove f_d è la frequenza fondamentale dopo il test di vibrazione, mentre f_0 è la frequenza fondamentale iniziale del provino. L'indice D è definito tra i valori 0 (nessun danneggiamento) e 1 (collasso totale), nel seguito viene espresso in percentuale, quindi tra 0 e 100 con lo stesso significato di 0 e 1 rispettivamente.

La costruzione di tale indice di danno si basa sulla osservazione che la frequenza fondamentale di un oggetto è legata intimamente alla sua rigidità, la quale rigidità si riduce con l'insorgere di fenomeni di fessurazione del materiale o di allentamento delle connessioni che tengono unito l'oggetto. Nella sperimentazione in esame, quindi, il danneggiamento risulterà sostanzialmente dalla sovrapposizione di tre fenomeni:

- Fratturazione interna del materiale lapideo di cui sono costituiti i frammenti dei provini (travertino e marmo di Carrara);
- Scollamento, cioè perdita della tenuta della colla dell'imperniaggio;
- Danneggiamento dei perni.

I suddetti fenomeni, tra l'altro, non vanno intesi come indipendenti, ma, al contrario, interagiscono influenzandosi l'un l'altro, spostando eventualmente il punto debole e modificando il meccanismo complessivo di rottura del provino a seconda che si attivi prima o prevalga un fenomeno piuttosto che un altro. Non si esclude, inoltre, la possibile rottura fragile, intesa nel senso di improvvisa senza preavviso, del provino con una sostanziale contemporaneità dei tre fenomeni suddetti.

Le frequenze fondamentali di oscillazione dei provini sono identificate tramite le consuete tecniche di identificazione dinamica applicate ai segnali accelerometrici misurati alla base e in testa a ogni provino durante i test di caratterizzazione dinamica dei provini eseguiti secondo come descritto nel paragrafo 4.4.

Le misure di spostamento dei marker del sistema di motion capture 3D, invece, sono utilizzate principalmente per verificare fenomeni di deformazione macroscopiche dei provini, con particolare riferimento all'apertura per scollamento della frattura ricomposta tra i due frammenti imperniati.

Per quanto concerne la PROVA 1 l'andamento delle frequenze fondamentali dei due provini e dei corrispondenti valori dell'indice di danno D sono mostrati nelle Figure 22 e 23 rispettivamente. Il pilastrino eseguito con metodo tradizionale mostra un calo molto graduale della frequenza, il che potrebbe indicare un lievissimo danneggiamento interno, fino al test con $FS = 1.4$. Il livello di danneggiamento diventa significativo dal test $FS = 1.6$ in poi. Gli spostamenti relativi tra i due frammenti ricomposti sono pressoché nulli, come si evidenzia dai grafici di Figura 24 in cui gli spostamenti rilevati sono dell'ordine dell'errore di misura pari a circa 0.1 mm. La prova al martello sonico rileva un calo elevatissimo della velocità sonica che conferma il notevole grado di danneggiamento del pilastrino (vedi paragrafo 5.4.2).

Il pilastrino eseguito con un perno tramite il metodo RestArt, invece, non mostra nessun calo di frequenza significativo, quindi nessun danneggiamento significativo. Anche la prova al martello sonico fornisce un calo della velocità sonica limitato rispetto a pilastrino analogo in condizioni iniziali (vedi paragrafo 5.4.2).

L'andamento delle frequenze fondamentali dei due provini e dei corrispondenti valori dell'indice di danno D della PROVA 2 sono illustrati nelle Figure 25 e 26 rispettivamente. Nella PROVA 2 il pilastrino con un perno eseguito con metodo tradizionale inizia a mostrare un calo graduale della frequenza dal test a $FS = 0.35$, calo che diventa importante ($D > 30\%$) dal test a $FS = 0.80$ e va a aumentare ulteriormente fino a raggiungere livelli di D pari a quasi 70% nell'ultimo test. Il provino però non presenta né scollamenti né rotture visibili dall'esterno (Figura 27), quindi il danneggiamento è dovuto a una microfessurazione interna, confermata dalla prova al martello sonico che rileva una velocità sonica ridotta (vedi paragrafo 5.4.2).

Il pilastrino in marmo con un perno realizzato con il metodo RestArt, invece, inizia a mostrare un calo della frequenza solo a partire dal test a $FS = 0.80$ e va a aumentare nell'ultimo test a $FS = 1.00$ raggiungendo un valore di D significativo ma ben più limitato rispetto a quello rilevato sul provino eseguito con il metodo tradizionale. Neanche questo provino presenta scollamenti né rotture visibili dall'esterno (Figura 27), quindi anche in questo caso il danneggiamento rilevato è imputabile a una microfessurazione interna, il

che è confermato dalla velocità sonica ricavata dalla prova con il martello sonico che cala significativamente (vedi paragrafo 5.4.2).

I risultati delle frequenze e dei relativi indici di danno ottenuti per la PROVA 3 sono graficati nelle Figure 28 e 29 rispettivamente. Gli spostamenti tra i frammenti ricomposti di entrambi i provini si vedono in Figura 30. Qui entrambi i provini sono eseguiti con il metodo RestArt, ma il pilastro realizzato con un solo perno mostra un netto calo della frequenza dopo il test con $PGA = 1.00$ g, livello comunque molto elevato di vibrazione sismica, confrontabile a un terremoto di intensità estremamente forte (IX grado della scala Mercalli). L'indice di danno D sale a quasi il 60%, rimanendo poi piuttosto stabile per i successivi 5 test in cui dall'esterno tuttavia non si evidenziano né lesioni né scollamenti tra i frammenti. Si suppone, quindi, che sia avvenuto un danneggiamento interno, ovvero l'apertura di una o più lesioni non visibili dall'esterno. Al test successivo con $PGA = 2.5$ g avviene la rottura finale con separazione dei due frammenti imperniati. A rottura avvenuta è ben visibile la lesione interna nel frammento di base che era impostata sull'unico perno attraversando trasversalmente l'intera sezione del pilastro (Figura 31). In Figura 32 si mostra lo stato del perno dopo la rottura dell'imperniaggio. La misura con martello sonico perde di senso e non viene effettuata.

Il pilastro con 3 perni, invece, non mostra alcun calo della frequenza fino a rottura finale con separazione dei due frammenti imperniati che avviene soltanto con il test a $PGA = 4.5$ g, un livello di eccitazione dinamica estremamente elevato tale da non essere riscontrabile in eventi sismici naturali e prossimo ai limiti massimi di accelerazione della tavola vibrante. In Figura 33 si può osservare lo stato dei perni dopo la rottura dell'imperniaggio. La misura con martello sonico perde di senso e non viene effettuata.

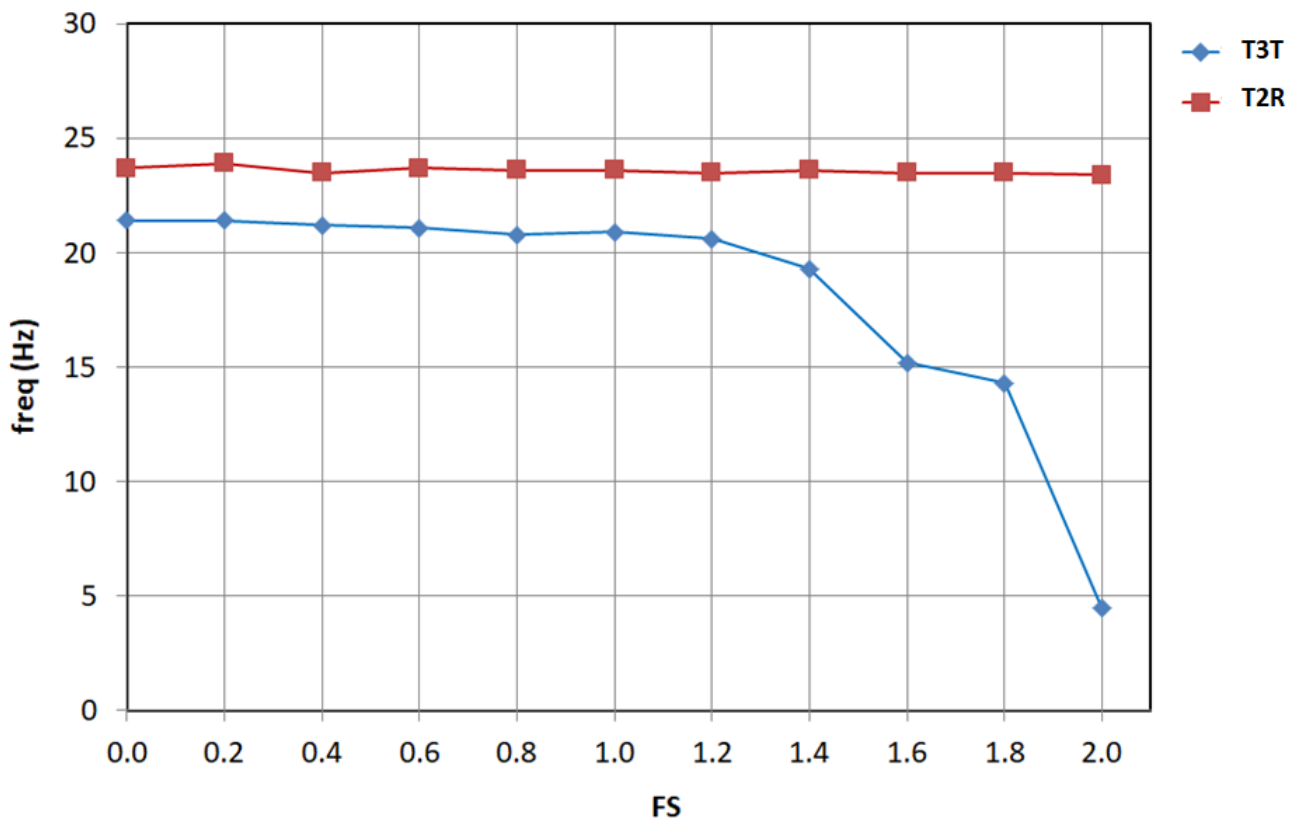


Figura 22. Andamento della frequenza fondamentale dei provini T3T e T2R testati nella PROVA 1.

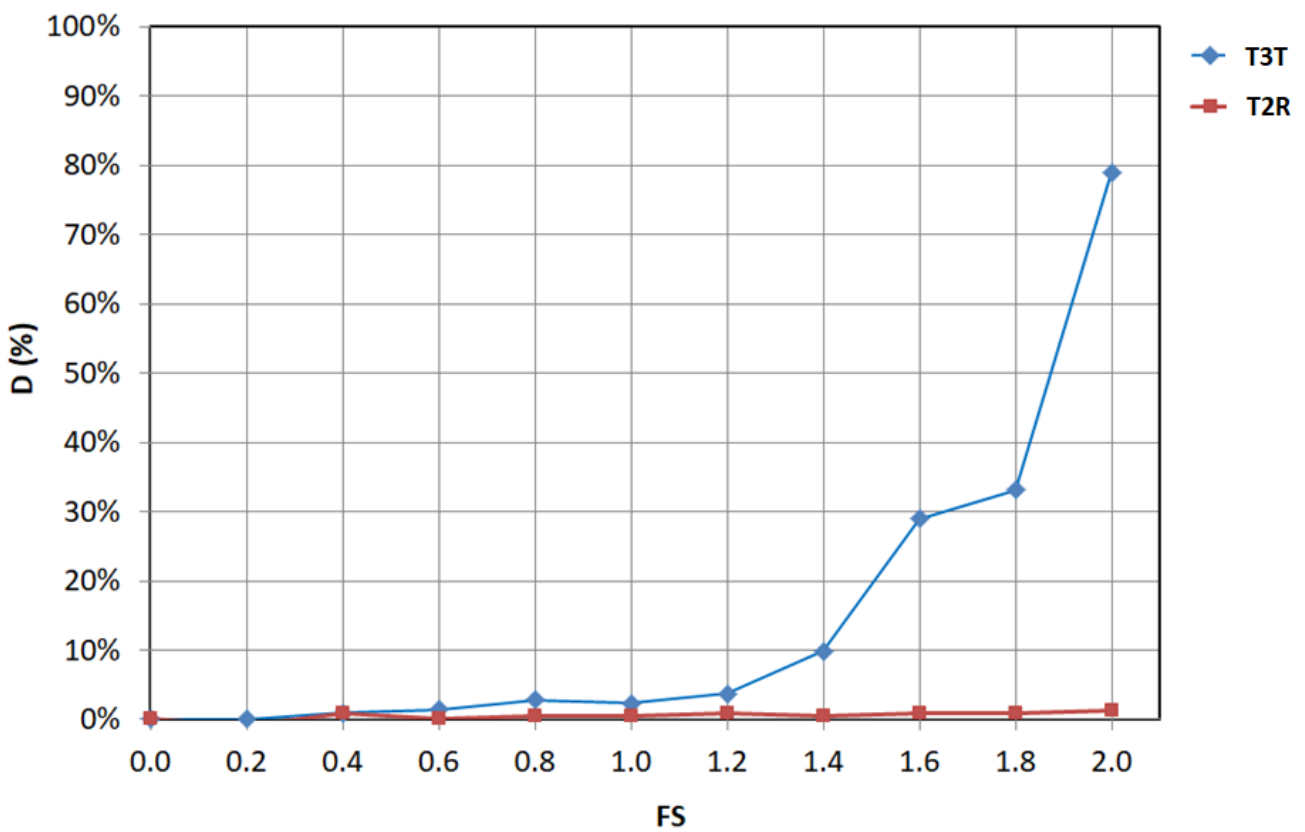


Figura 23. Andamento dell'indice di danno D dei due provini T3T e T2R testati nella PROVA 1.

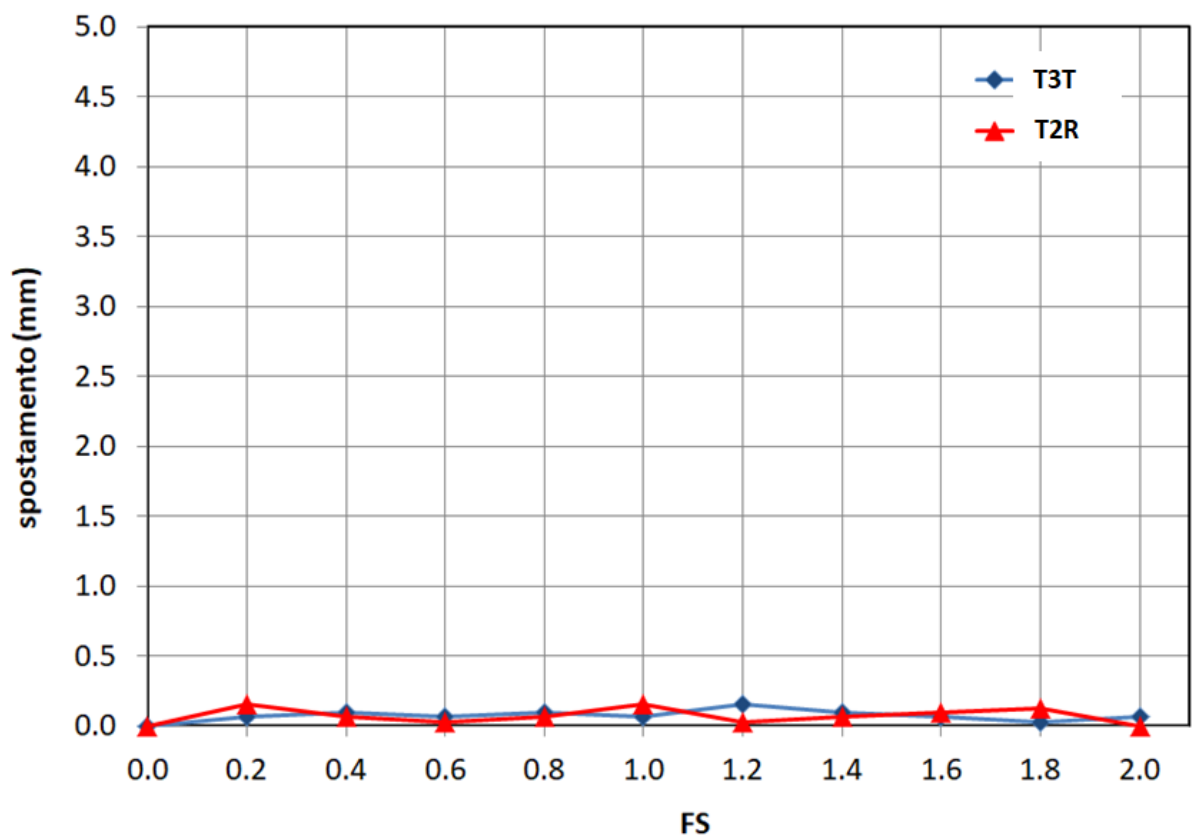


Figura 24. Spostamenti tra i due frammenti dei due provini T3T e T2R testati nella PROVA 1.

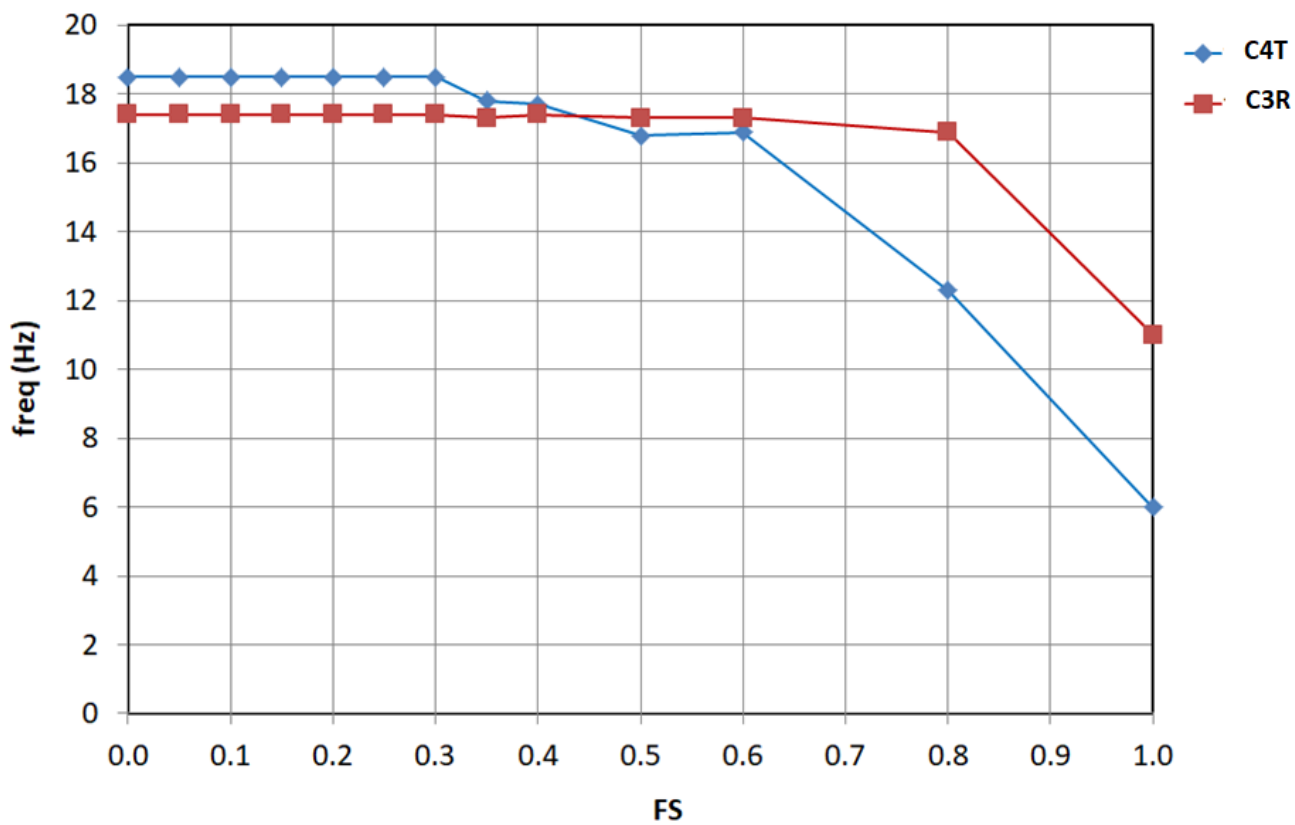


Figura 25. Andamento della frequenza fondamentale dei provini C3R e C4T testati nella PROVA 2.

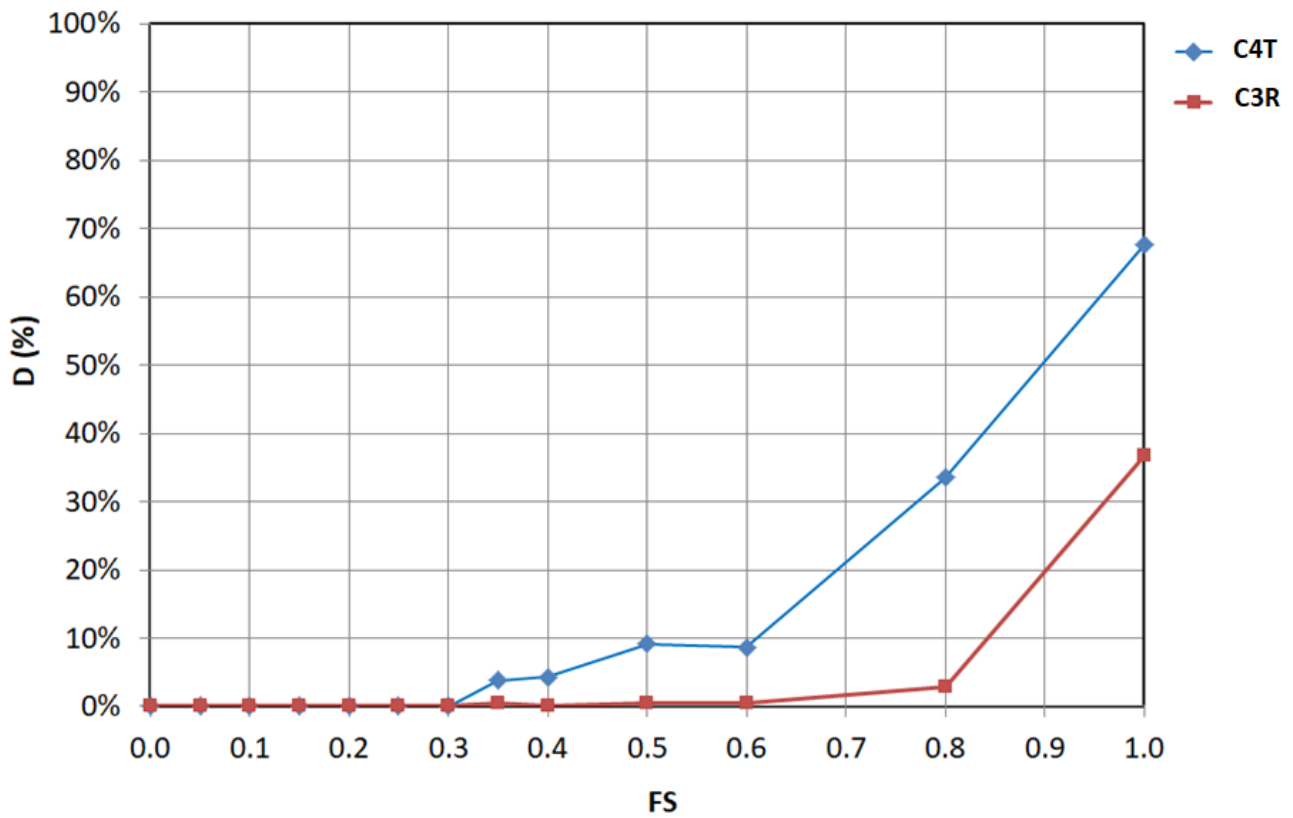


Figura 26. Andamento dell'indice di danno D dei due provini C3R e C4T testati nella PROVA 2.

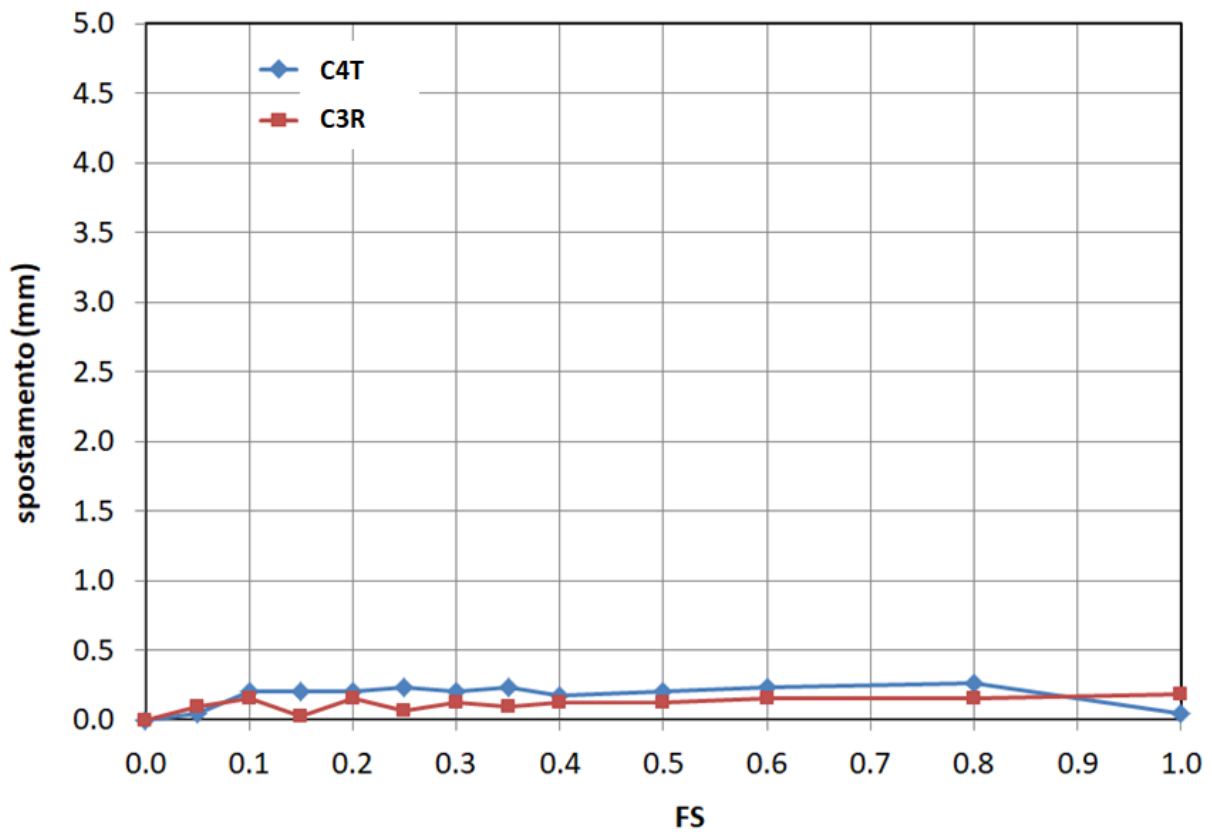


Figura 27. Spostamenti tra i due frammenti dei due provini C3R e C4T testati nella PROVA 2.

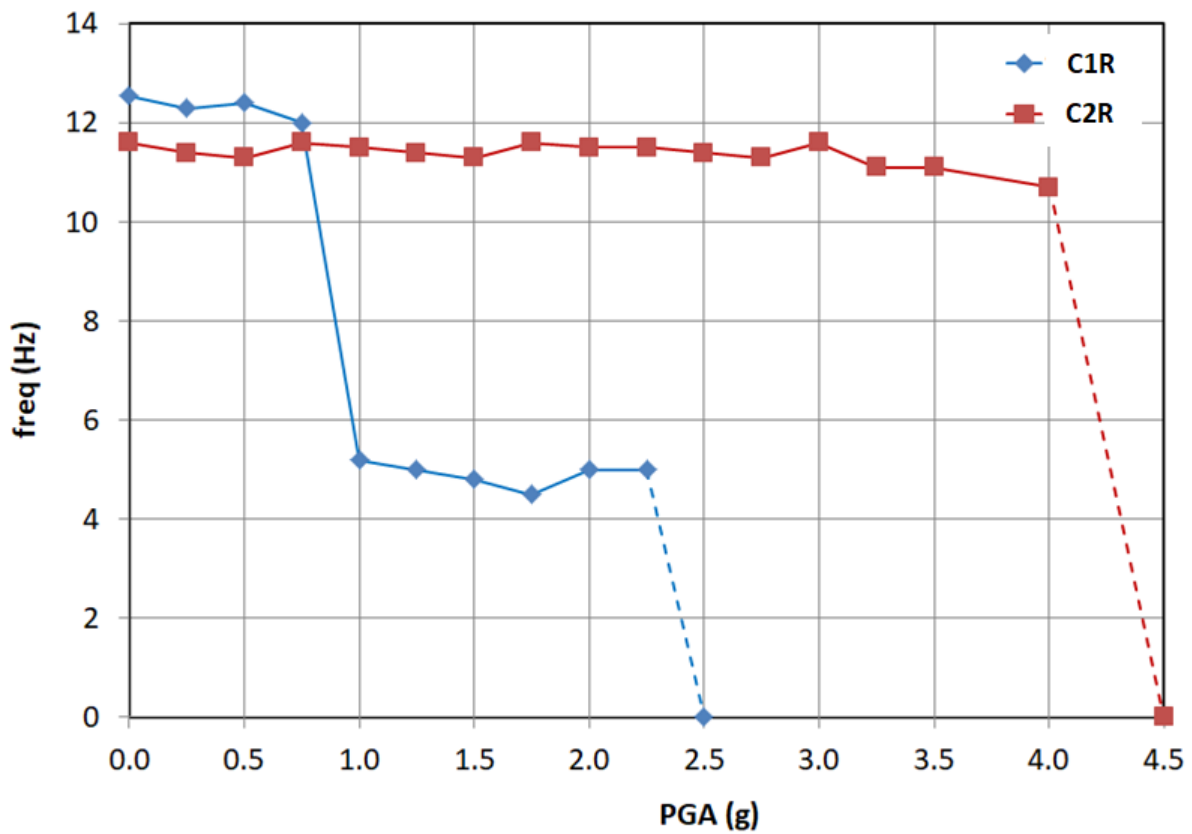


Figura 28. Andamento della frequenza fondamentale dei provini C1R e C2R testati nella PROVA 3.

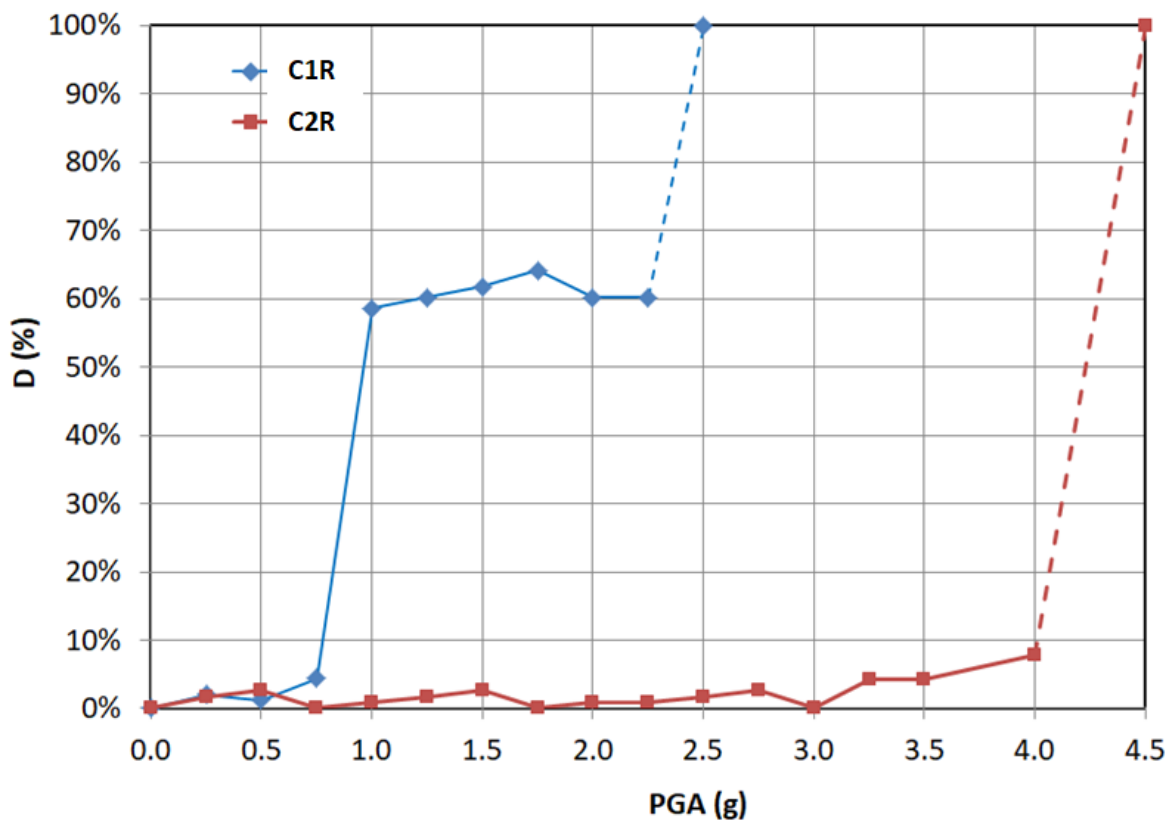


Figura 29. Andamento dell'indice di danno D dei due provini C1R e C2R testati nella PROVA 3.

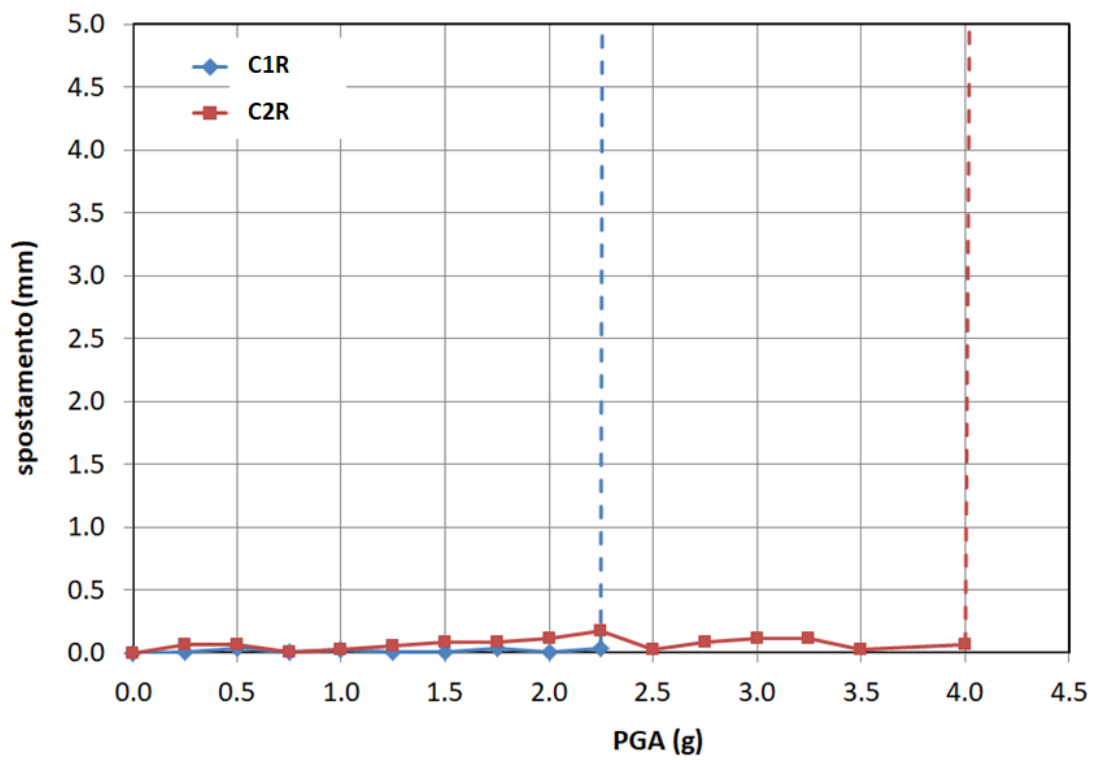


Figura 30. Spostamenti tra i due frammenti dei due provini C1R e C2R testati nella PROVA 3.

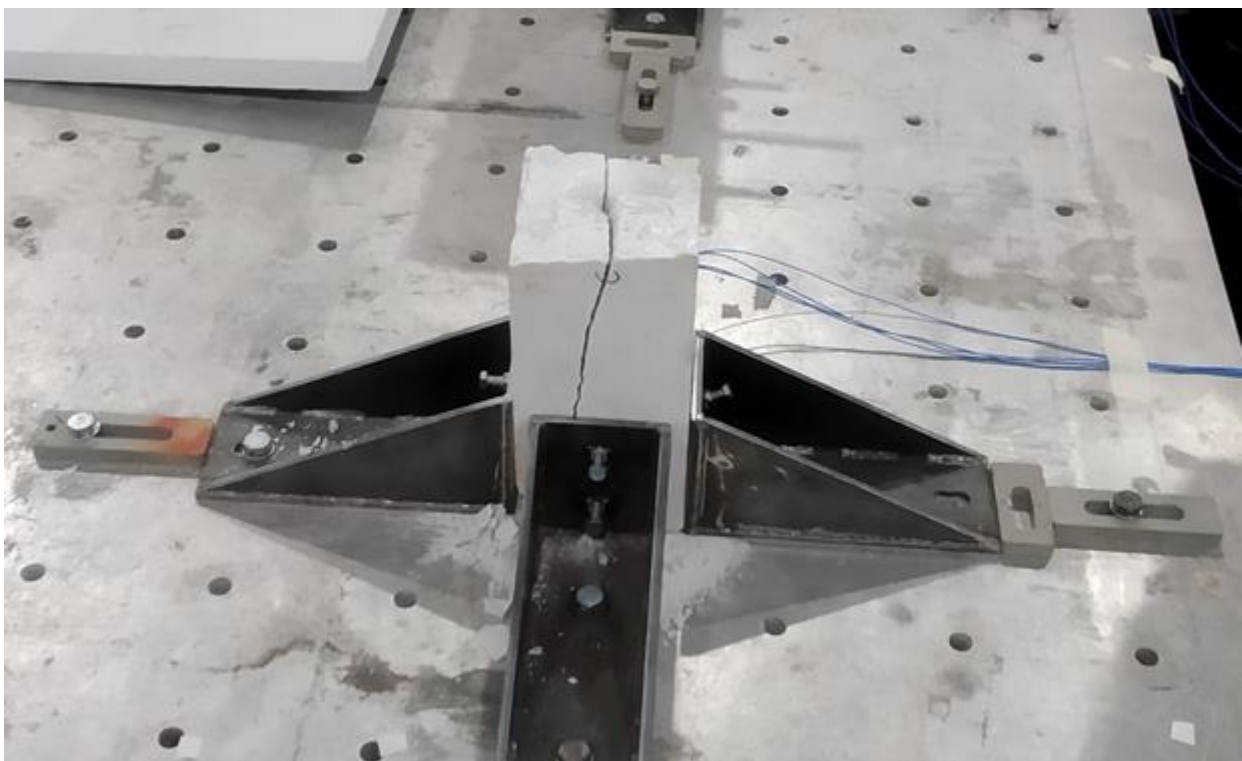


Figura 31. Lesione del frammento di base dopo rottura finale del provino C1R con un perno nella PROVA 3.



Figura 32. Dettaglio del frammento superiore del provino C1R realizzato con un solo perno dopo rottura finale nella PROVA 3.



Figura 33. Rottura finale del provino C2R con 3 perni nella PROVA 3.

5.4. PnD con martello sonico

Nei seguenti sotto paragrafi vengono descritte la strumentazione impiegata e le misure eseguite con il martello sonico.

5.4.1. Strumentazione impiegata

Lo strumento IMG 5200 CSD (Figura 34) è una apparecchiatura digitale a bassa frequenza per controlli di materiali non omogenei, dotato di schermo *touch-screen* ha molteplici funzioni quali la memorizzazione degli oscillogrammi (A-Scan) e relativi parametri di calibrazione. Funziona con batterie ricaricabili NiMH con autonomia di 8 ore. Controllo in Bassa Frequenza dei materiali compositi: Calcestruzzo - Strutture in mattoni - Materiali lapidei - Fibre di vetro e di carbonio - Pietre naturali - Materiali compositi - Marmi - Graniti. Palificazioni, controllo cross-hole con UMACS.



Figura 34. Strumentazione impiegata per le prove con martello sonico.

5.4.2. Misure eseguite

Le misure sono effettuate posizionando la sonda equipaggiata con il sensore accelerometrico a un estremo del provino mentre si colpisce l'estremo opposto con il martello strumentato. Ogni provino è stato misurato su ognuno dei quattro lati, denominati A, B, C e D secondo la lunghezza. Le misure sono state eseguite in un verso e poi invertendo la posizione di sonda e martello secondo lo schema in Figura 35. L'allestimento

delle misure è illustrato in Figura 36. In Figura 37 la visualizzazione di una misura eseguita sul display dello strumento.

Sono state effettuate 3 misure soniche per ogni verso per un totale di 6 misure per ogni lato il cui valore è espresso in microsecondi. Esso rappresenta il tempo che impiega il colpo del martello per giungere all'estremità opposta del provino dove è posizionato il sensore accelerometrico. Le 3 misure di tempo sono mediate e tramite la lunghezza in metri del percorso dell'onda si calcola la velocità del suono espressa in metri al secondo.

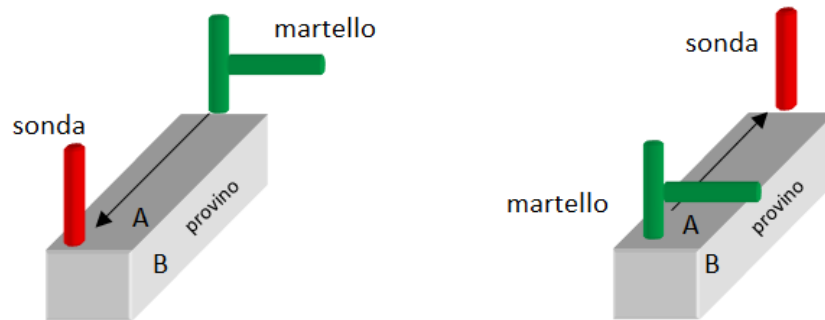


Figura 35. Schema delle misure effettuate con martello sonico sui provini in direzione diretta (a sinistra) e inversa (a destra).

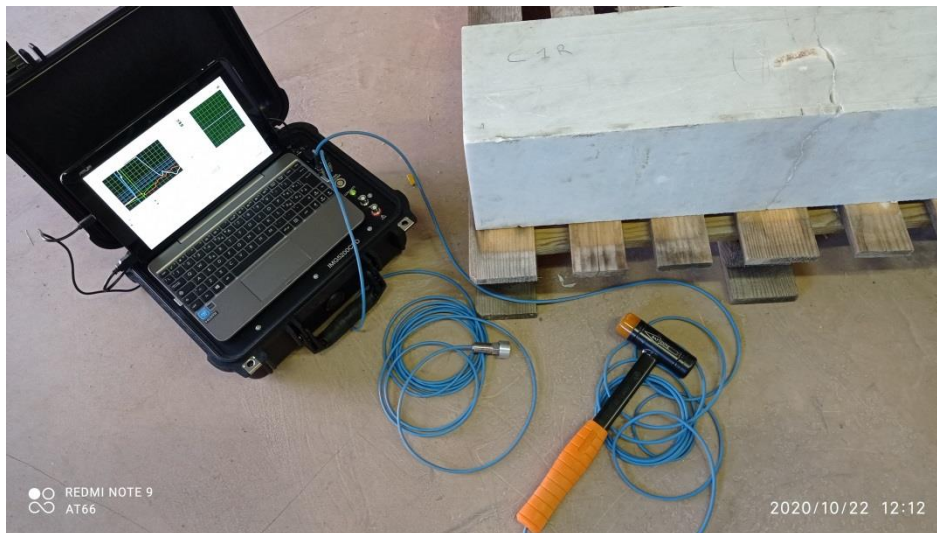


Figura 36. Allestimento delle misure effettuate con martello sonico sui provini.

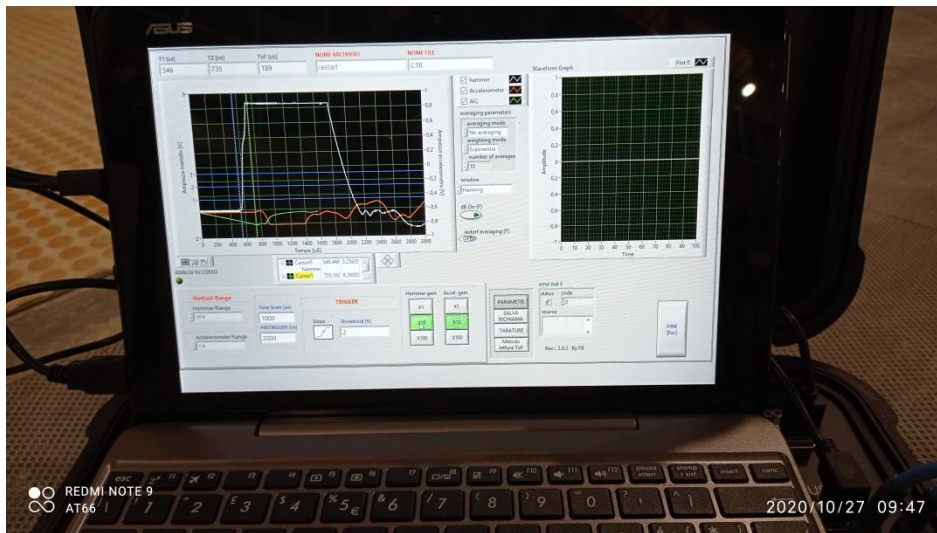


Figura 37. Visualizzazione del segnale: in bianco il colpo del martello strumentato e in rosso il segnale ricevuto dal sensore accelerometrico nella sonda.

Le sigle dei campioni hanno il seguente significato:

T = travertino

C = marmo di Carrara

N = Numero del provino

0 (zero) = provino integro

R = ricomposto con metodo RestArt

T = ricomposto con metodo tradizionale

Nella seguente Tabella 4 sono riportati nel dettaglio tutti i risultati delle misure eseguite con il martello sonico sui provini preparati per le prove su tavola vibrante. Ci sono anche dei provini di riserva che non sono stati impiegati nelle prove su tavola vibrante. Inoltre, ci sono anche un provino integro in travertino e uno in marmo, con i quali è possibile confrontare i valori ottenuti sui provini imperniati.

Tabella 4. Risultati delle misure di velocità sonora (Vel) ottenute con martello sonico su ogni provino, su ogni lato (A, B, C e D) in direzione diretta e inversa (inv) e relativi valori medi.

Provino C1R

Lato	A	B	C	D	inv A	inv B	inv C	inv D	media
Spessore m	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	
1° microsec	193	170	310	288	216	278	292	303	
2° microsec	204	188	260	329	223	307	205	295	
3° microsec	213	188	238	330	215	297	208	275	
Media microsec	203,33	182,00	269,33	315,67	218,00	294,00	235,00	291,00	
Vel m/s	3983,61	4450,55	3007,43	2566,00	3750,00	2913,67	2773,97	2673,27	3264,81

Provino C2R

Lato	A	B	C	D	inv A	inv B	inv C	inv D	media
Spessore m	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	
1° microsec	238	191	196	181	191	183	190	176	
2° microsec	190	193	191	209	195	189	191	185	
3° microsec	206	206	190	178	185	209	192	191	
Media microsec	211,33	196,67	192,33	189,33	190,33	193,67	191,00	184,00	
Vel m/s	3847,00	4133,90	4227,04	4294,01	4256,54	4442,62	4278,95	4619,32	4262,42

Provino T1R

Lato	A	B	C	D	inv A	inv B	inv C	inv D	media
Spessore m	0,805	0,805	0,805	0,805	0,805	0,805	0,805	0,805	
1° microsec	198	236	211	223	241	225	232	222	
2° microsec	227	232	219	211	257	216	237	216	
3° microsec	259	237	223	216	253	215	258	226	
Media microsec	228,00	235,00	217,67	216,67	250,33	218,67	242,33	221,33	
Vel m/s	3530,70	3425,53	3698,32	3715,38	3340,25	3577,78	3469,83	3626,13	3547,99

Provino T1R

(dopo il trasporto)

Lato	A	B	C	D	inv A	inv B	inv C	inv D	media
Spessore m	0,805	0,805	0,805	0,805	0,805	0,805	0,805	0,805	
1° microsec	241	184	223	249	249	226	226	260	
2° microsec	266	226	191	194	245	237	234	183	
3° microsec	257	223	242	223	227	223	241	207	
Media microsec	254,67	211,00	218,67	222,00	240,33	228,67	233,67	216,67	
Vel m/s	3160,99	3815,17	3681,40	3626,13	3232,93	3561,95	3561,95	3096,15	3467,08

Provino C3R

Lato	A	B	C	D	inv A	inv B	inv C	inv D	media
Spessore m	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	
1° microsec	191	216	202	182	220	201	199	205	
2° microsec	214	200	207	184	222	192	197	192	
3° microsec	241	198	226	198	227	183	216	191	
Media microsec	215,33	204,67	211,67	188,00	223,00	192,00	204,00	196,00	
Vel m/s	3766,25	3962,54	3831,50	4313,83	3686,36	4034,83	4075,38	3956,10	3953,35

Provino C3R**(dopo il trasporto)**

Lato	A	B	C	D	inv A	inv B	inv C	inv D	media
Spessore m	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	
1° microsec	195	201	237	186	203	177	180	200	
2° microsec	183	191	187	186	185	166	186	183	
3° microsec	184	189	178	184	197	178	179	184	
Media microsec	187,33	193,67	200,67	185,33	195,00	173,67	181,67	189,00	
Vel m/s	4329,18	4187,61	4041,53	4375,90	3995,07	4581,92	4505,56	4055,00	4258,97

Provino T2R

Lato	A	B	C	D	inv A	inv B	inv C	inv D	media
Spessore m	0,807	0,807	0,807	0,807	0,807	0,807	0,807	0,807	
1° microsec	249	210			249	221		205	
2° microsec	261	205			215			193	
3° microsec	220	261			267				
Media microsec	243,33	225,33			243,67			199,00	
Vel m/s	3316,44	3581,36			3240,96			3936,59	3518,84

Provino C4T

Lato	A	B	C	D	inv A	inv B	inv C	inv D	media
Spessore m	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	
1° microsec	193	190	188	164	207	218	219	180	
2° microsec	194	188	195	172	193	201	189	180	
3° microsec	206	189	205	188	252	195	182	216	
Media microsec	197,67	189,00	196,00	174,67	217,33	204,67	196,67	192,00	
Vel m/s	4097,81	4285,71	4132,65	4637,40	3913,04	3715,60	3698,63	4500,00	4122,61

Provino C4T**(dopo il trasporto)**

Lato	A	B	C	D	inv A	inv B	inv C	inv D	media
Spessore m	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	

1° microsec	180	184	187	190	191	180	194	192	
2° microsec	196	195	194	201	205	199	209	198	
3° microsec	185	181	191	192	214	197	221	189	
Media microsec	187,00	186,67	190,67	194,33	203,33	192,00	208,00	193,00	
Vel m/s	4331,55	4339,29	4248,25	4168,10	4240,84	4500,00	4175,26	4218,75	4277,75

Provino T0

Lato	A	B	C	D	inv A	inv B	inv C	inv D	media
Spessore m	0,842	0,842	0,842	0,842	0,842	0,842	0,842	0,842	
1° microsec	216	210	228	219	220	181	224	218	
2° microsec	232	218	224	228	224	227	205	209	
3° microsec	233	214	180	225	206	220	229	215	
Media microsec	227,00	214,00	210,67	224,00	216,67	209,33	219,33	214,00	
Vel m/s	3709,25	3934,58	3996,84	3758,93	3827,27	4651,93	3758,93	3862,39	3937,51

Provino C0

Lato	A	B	C	D	inv A	inv B	inv C	inv D	media
Spessore m	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	0,811	
1° microsec	195	191	183	181	176	198	182	231	
2° microsec	201	200	198	209	188	202	200	200	
3° microsec	188	162	194	215	176	197	186	180	
Media microsec	194,67	184,33	191,67	201,67	180,00	199,00	189,33	203,67	
Vel m/s	4166,10	4399,64	4231,30	4021,49	4607,95	4095,96	4456,04	3510,82	4186,16

Nella tabella 5 vengono riassunti i risultati delle misure effettuate per ogni provino insieme con le loro principali caratteristiche. Si noti che tutti i valori dei provini imperniati sono piuttosto simili a quelli dei provini integri T0 e C0, il che dimostra la buona qualità degli imperniaggi eseguiti.

Nella Tabella 6 vengono riportati i risultati delle misure di velocità sonora riscontrate sui provini prima della partenza dal laboratorio di Ma.Co.Rè. e dopo l'arrivo al laboratorio ENEA del C.R. Casaccia per verificare se il trasporto abbia influenzato l'integrità degli imperniaggi eseguiti. I valori di velocità dei provini T1R e C4T sono rimasti simili dopo il trasporto (variazioni di circa 2% sono confrontabile con l'incertezza di misura che è di circa il 5%) a significare che non si è verificato nessun danneggiamento durante il trasporto. Per il provino C3R la velocità è variata in modo leggermente più significativamente, ma è aumentata, il che, invece che un danneggiamento, sembrerebbe indicare un miglioramento della risposta del provino, che potrebbe essere dovuta a consolidamento e

maturazione della colla usata nella giunzione imperniata che era appena stata ricomposta al tempo della prima misura, mentre la seconda misura è stata eseguita alcuni giorni dopo.

Tabella 5. Tabella riassuntiva dei risultati delle misure con martello sonico con le caratteristiche di ogni provino verificato.

Provino	Numero di perni, materiale, diametro e lunghezza	Accostati a compressione	Diametro fori (mm)	Altezza (cm)	Lato 1 (cm)	Lato 2 (cm)	Vel. (m/s)
C1R	1 acciaio 10 mm 15 cm	si	10	81,0	18,5	18,3	3264
C2R	3 fb resina liscia 10 mm 14 cm	si	10	81,3	18,0	18,3	4262
C3R	1 acciaio 10 mm 20 cm	cinghie	10	81,1	18,5	18,0	3953
C4T	1 acciaio filettato 10 mm 21	cinghie	15	81,0	18,0	18,5	4122
T1R	3 fb resina filettata 8 mm 10	si	10	80,5	18,2	18,0	3547
T2R	1 acciaio 10 mm 20 cm	si	10	80,7	18,5	18,0	ND
T3T	1 acciaio 10 mm 20 cm	cinghie	10	81,0	18,0	18,4	ND
T0	INTEGRO	-	-	84,2	18,3	18,3	3937
C0	INTEGRO	-	-	81,1	18,2	18,2	4186

Tabella 6. Confronto prima e dopo il trasporto.

Provino	Vel prima (m/s)	Vel dopo (m/s)	Variazione (m/s)	Variazione %
T1R	3547,99	3467,08	-80,91	-2,3%
C3R	3953,35	4258,97	+305,62	+7,4%
C4T	4122,61	4277,75	+115,15	+2,7%

Nella tabella 7 si illustra il confronto tra i risultati dei provini ricomposti con metodo RestArt e con metodo tradizionale dopo i test su tavola vibrante. Per la valutazione del calo della velocità sonica è stato preso a riferimento il valore dei provini dopo il trasporto al laboratorio ENEA del C.R. Casaccia, che costituisce il loro stato iniziale prima dei test su tavola vibrante.

Tabella 7. Confronto tra i provini con metodo RestArt e con metodo tradizionale testai nelle batterie di test PROVA 1 e PROVA 2. Le misure di velocità sonica (Vel) sono riportate per ogni provino e su ogni lato (A, B, C e D) misurato, in direzione diretta e inversa (inv) e relativi valori medi.

PROVA 1		26/10/ 2020			
Metodo RESTART	provino	T2R			
Riferimento* Vel m/s					3467,08
Lato	A	C	inv A	inv C	media
Distanza tra i sensori					
1° microsec	0,5	0,5	0,5	0,5	
2° microsec	136	265	131	203	
3° microsec	150	237	129	187	
Media microsec	185	248	130	188	
Vel m/s	157,00	250,00	130,00	192,67	
	3184,71	2000,00	3816,79	2463,05	2866,14
Riduzione					
%					17,3%
Metodo Tradizionale	provino	T3T			
Riferimento* Vel m/s					3467,08
Lato	A	C	inv A	inv C	media
Distanza tra i sensori					
1° microsec	0,5	0,5	0,5	0,5	
2° microsec	593	778	677	612	
3° microsec	625	632	784	635	
Media microsec	648	658	718	608	
Vel m/s	622,00	689,33	726,33	618,33	
	803,86	725,34	738,55	816,99	771,19
Riduzione					
%					77.7%

*il riferimento di velocità iniziale è il provino T1R dopo il trasporto, in quanto i provini T2R e T3T non è stato possibile misurarli.

PROVA 2		27/10/ 2020			
Metodo RESTART	provino	C3R			
Riferimento Vel m/s					4258,97
Lato	D	B	inv D	inv B	
Distanza tra i sensori	0,5	0,5	0,5	0,5	

1° microsec	213	301	209	273	
2° microsec	244	188	188	212	
3° microsec	195	227	202	212	
Media microsec	217,33	238,67	199,67	232,33	
Vel m/s	2300,61	2094,97	2392,34	1831,50	2154,86
				Riduzione %	49,4%

Metodo Tradizionale	provino	C4T			
Riferimento Vel m/s					4277,75
Lato	D	B	inv D	inv B	media
Distanza tra i sensori	0,5	0,5	0,5	0,5	
1° microsec	225	214	214	184	
2° microsec	196	161	257	151	
3° microsec	230	147	222	171	
Media microsec	217,00	174,00	231,00	168,67	
Vel m/s	2304,15	2873,56	2336,45	2717,39	2557,89
				Riduzione %	40,2%

Come si evidenzia dalla tabella 7 nella PROVA 1 il provino T2R in travertino ricomposto con il metodo RestArt ha subito una riduzione della velocità sonica limitata, pari al 17,3%, mentre il provino T3T restaurato con il metodo tradizionale ha avuto un calo molto maggiore, pari al 77,7%, che dimostra un danneggiamento molto più avanzato.

Nella PROVA 2 i provini in marmo di Carrara hanno subito un calo finale della velocità sonica confrontabile (49,4% e 40,2%) su livelli che denotano un danneggiamento significativo, ma non essendo evidente dall'esterno nessuna dislocazione dell'imperniaggio, si suppone che tale danneggiamento è dovuto a fessurazione interna. In questi casi l'entità della riduzione della velocità sonica è influenzato piuttosto dall'orientamento delle fessure interne rispetto alla direzione dell'allineamento di misura che detta il percorso delle onde sonore nel materiale.

5.5. Analisi di filmati video con tecnica derivata dal Moto Magnificato (MM)

È stata condotta un'analisi tramite elaborazione numerica di alcuni filmati video registrati durante la PROVA 3 del 28 ottobre 2020 per mezzo di algoritmi di Moto Magnificato (MM), in grado di magnificare i movimenti degli oggetti ripresi nei video.

Poiché il Moto Magnificato è una metodologia di recente introduzione nel settore analisi delle vibrazioni, se ne darà una breve descrizione. Il MM consiste nella amplificazione di

piccoli spostamenti ravvisabili in comuni video digitali. Non si tratta di un ingrandimento delle immagini, ma di una vera e propria amplificazione dei piccoli moti delle strutture che altrimenti risulterebbero invisibili, pur lasciando inalterata la topologia della singola immagine. In un certo senso, i micro-spostamenti presenti nel video originale vengono amplificati come se si disponesse di un microscopio. I video sono processati tramite algoritmi recentemente implementati e finora utilizzati in vari campi: medicina, fisiologia, meccanica, proprietà dei materiali. Un primo evidente vantaggio del MM 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 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 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" *contactless*. In pratica ogni pixel è interpretato come sensore che produce un segnale lungo quanto il video, frame dopo frame. Il segnale è dato dalla variazione di intensità del pixel e può essere trattato tramite l'analisi in frequenza. Infine, poiché ogni punto della superficie del campione ripreso nel video è un sensore, non si resta vincolati dalla scelta immediata dei punti da analizzare, ma nel futuro sarà comunque possibile scegliere altre aree da analizzare. La qualità della registrazione video è decisiva ai fini della accuratezza e precisione delle analisi quantitative, il che spinge ad impiegare dispositivi video di alto costo: tuttavia si è constatato come anche comuni telefoni cellulari forniscano prestazioni adeguate. Una altra caratteristica interessante è rappresentata dalla possibilità di selezionare un range di frequenze entro cui applicare la amplificazione. In tal modo, la semplice analisi visuale determina le frequenze in grado di influire maggiormente sui provini. Si sottolinea che non essendo legata a misurazioni puntuali, con i video di MM sarà sempre possibile effettuare nuovi tipi di analisi, anche se non specificamente indicati in questo documento.

Nel progetto RestArt si è ritenuto di procedere con analisi video innovative denominate "Moto Magnificato" per integrare le misurazioni accelerometriche. L'integrazione nasce dalla necessità di studiare il comportamento dei campioni sottoposti alle sollecitazioni sismiche della tavola vibrante in modo intuitivo e diretto, superando i limiti degli accelerometri o di altro sensore simile. Per quanto le misure prodotte da detti strumenti siano precise ed accurate, la analisi non è risolta in sé dalla qualità delle misure stesse,

ma va interpretata opportunamente. E' ben noto, ad esempio, che una repentina diminuzione della frequenza fondamentale di oscillazione di una struttura indica una perdita di rigidità ed un probabile danno strutturale. Tale criterio è stato adottato anche per i test del 28 ottobre 2020 sui due pilastri costruiti con tecniche diverse, di cui si dà conto altrove nella presente relazione. La procedura richiede però un setup sperimentale ben curato, una lunga serie di test su tavola ed infine necessita di una attenta interpretazione da parte di personale esperto. D'altra parte, le elaborazioni di Moto Magnificato, in assenza di informazioni a priori sulla frequenza, devono seguire criteri di calcolo esaustivi e *time-consuming*, quindi le due metodologie sono complementari.

La magnificazione dei video ripresi durante alcuni test su tavola consente invece di vedere i movimenti dei pilastri con una certa chiarezza e di valutarne con facilità la stabilità strutturale, anche comparativamente. Allo stesso tempo, è possibile rendersi conto dello stato del setup sperimentale, specialmente dei fissaggi, che naturalmente tendono ad allentarsi in maniera non omogenea ed intervenire per ripristinarli, evitando così il prodursi di oscillazione spurie. Peraltro, la cavetteria necessaria agli accelerometri ed ogni altro elemento non fissato e non solidale coi pilastri costituisce un disturbo per gli algoritmi, producendo una distorsione nelle immagini.

Un vantaggio non trascurabile consiste poi nella riusabilità dei video originali (non magnificati) per nuovi studi. In ogni momento si può isolare una certa area della immagine, non presa in considerazione precedentemente ed elaborarla, cioè l'analisi non è limitata dai vincoli spazio-temporali tipici dei sensori accelerometrici e simili.

Il Moto Magnificato rende altresì possibili indagini di tipo quantitativo nel dominio della frequenza, in due modi: o variando il range di frequenza entro cui l'algoritmo di magnificazione agisce, esaltandone alcune e trascurandole le altre, oppure ottenendo la serie temporale delle variazioni di intensità dei pixel di una parte delle immagini ed elaborandole con le tecniche tradizionali di Fourier (analisi modale, FRF ecc.). In questo caso, poiché erano già disponibili le misurazioni derivanti dagli accelerometri, la estrazione della serie temporale non è stata necessaria. Invece, la variazione esaustiva dei range di frequenza nei video magnificati ha rivelato le frequenze di interesse per le strutture in esame, discusse nel seguito in dettaglio.

Infine, si noti come restringendo moltissimo il range, fino alla massima risoluzione in frequenza che dipende dalla lunghezza del video e perciò nel nostro caso si aggira intorno

a circa $\pm 0,05$ Hz possiamo visualizzare i modi di vibrazione e le risonanze con buona precisione, anche se la stima delle ampiezze risulta meramente qualitativa.

5.5.1. Analisi delle basse frequenze ed alta intensità di sollecitazione

In questo caso si registrano grandi variazioni di oscillazione tra i pilastri, che mettono bene in evidenza la differenza di comportamento dei due pilastri. Di seguito si mostreranno alcuni frame di video magnificati con diversa amplificazione e range di frequenza, ma relativi allo stesso video originale precedente il test conclusivo, in cui il pilastro C1R, realizzato con un solo perno, collassa. Dai vari frame, presentati in ordine di amplificazione, si possono osservare le deformazioni subite dal pilastro, i punti in cui si realizzerà successivamente la frattura, la sensibilità alle varie frequenze. Si noti come elevando il valore di amplificazione entro una banda di frequenze relativamente ampia inevitabilmente viene introdotto del rumore, che distorce alquanto le immagini. Nel seguito, si prenderanno in considerazione il test su tavola vibrante riprodotto il trasporto dell'oggetto su un percorso accidentato precedente la prova che ne determinerà la frattura, ed un altro test in cui l'intensità delle vibrazioni è invece molto bassa. In entrambi i casi, la magnificazione consente di apprezzare l'entità delle deformazioni prodotte dalle vibrazioni, in misura decisamente maggiore sul pilastro C1R, ossia quello assemblato con un solo perno.

Sono state condotte analisi estese nel range di frequenze 1 – 8 Hz per determinare i comportamenti di interesse delle strutture, qui tuttavia si presentano soltanto i risultati maggiormente rilevanti. I frame di Figura 40 e 41 sono invece tratti dal test sismico a bassa intensità di sollecitazione, precedente il test di cui sopra, e riportati per un confronto con i casi analoghi del test ad alta intensità.

Nei frame delle Figure 38-41 relative al test sismico ad alta intensità, precedente come detto il test del collasso, si susseguono le amplificazioni (A) seguenti:

- A = 10 nel range di frequenze 1,0 - 8,0 Hz
- A = 20 nel range di frequenze 2,0 - 6,0 Hz
- A = 30 nel range di frequenze 2,5 - 6,5 Hz
- A = 60 nel range di frequenze 3,5 - 6,5 Hz

Per basse amplificazioni le frequenze intorno a 3 Hz producono una notevole oscillazione sul piano X – Z (Figura 40). Man mano che si aumenta A, si riduce il range fino ad isolare un range 3,5 – 6,5 Hz in cui (vedere Figura 41) risulta molto chiaramente una notevole

deformazione subita dal pilastro C1R sul piano Y – Z indicata, mentre il C2R appare maggiormente rigido. Poiché il moto sul piano X – Z è stato evidenziato con una amplificazione di $A = 30$, mentre quello sul piano Y – Z amplifica con $A = 60$, è chiaro che la sollecitazione X – Z è molto più rilevante. Infatti, successivamente la frattura si produrrà lungo il piano X – Z.

Il moto del provino C1R sul piano Y – Z è visibile per una amplificazione grosso modo doppia rispetto al piano X – Z in un range di frequenze quasi uguale, indicando una dislocazione maggiore lungo l'asse X, che si rende apprezzabile per $A = 30$. Il pilastro C2R conferma la propria stabilità. Si nota come l'oscillazione precedente il collasso si aggira, in termini di frequenze, intorno ai 5 Hz, coerentemente con il risultato ottenuto dai dati accelerometrici. Risulta, inoltre, una notevole sensibilità per il provino C1R nel range 3,5 – 6,5 Hz.



Figura 38. I pilastri all'inizio del test precedente la prova che ha prodotto il collasso: a sinistra il provino C1R, a destra il provino C2R. In rosso è evidenziata la frattura ricomposta.



Figura 39. Amplificazione $A = 20$, range 2 – 6 Hz. Anche con una ridotta magnificazione, si osservano diverse ampiezze di oscillazioni per i due pilastri.

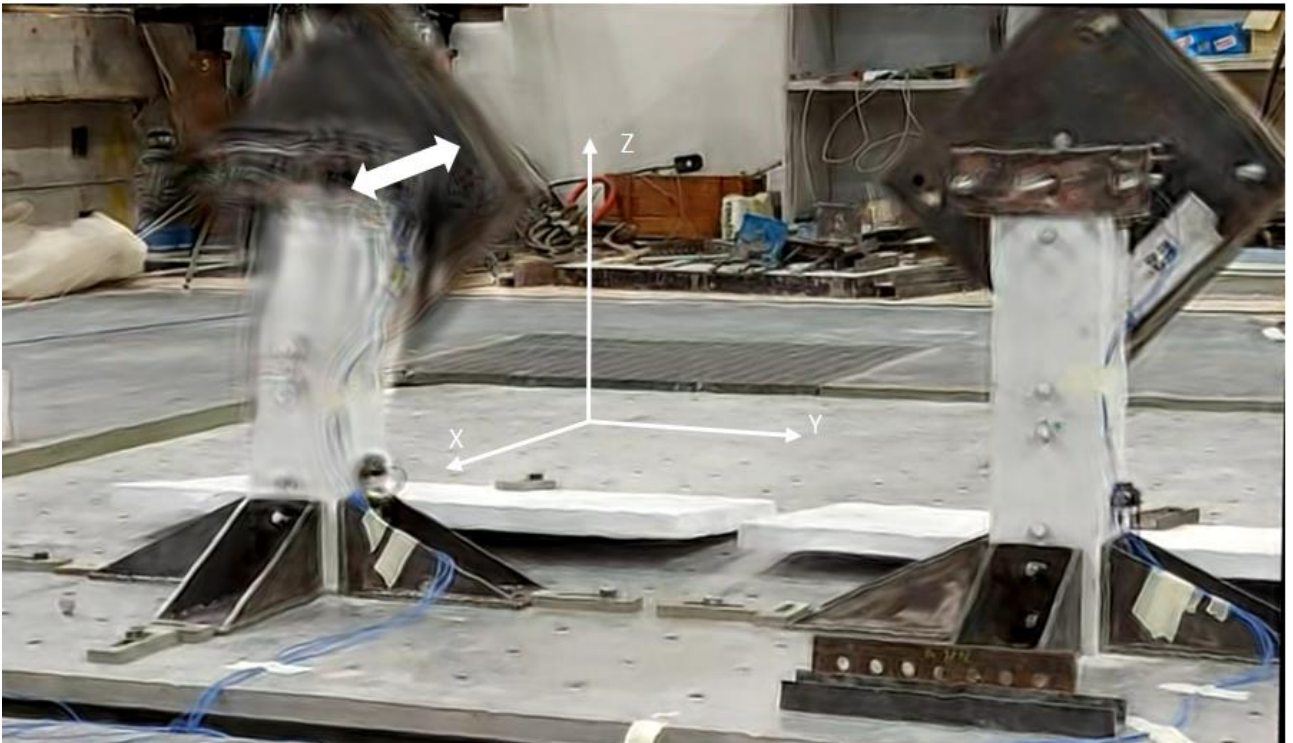


Figura 40. Amplificazione $A = 30$, range 2,5 – 6,5 Hz. Il moto avviene sul piano X – Z. A questo livello di amplificazione le differenze tra i due pilastri sono facilmente apprezzabili. La distorsione della immagine è causata da vari tipi di rumore introdotti nell'algoritmo ed amplificati eccessivamente.

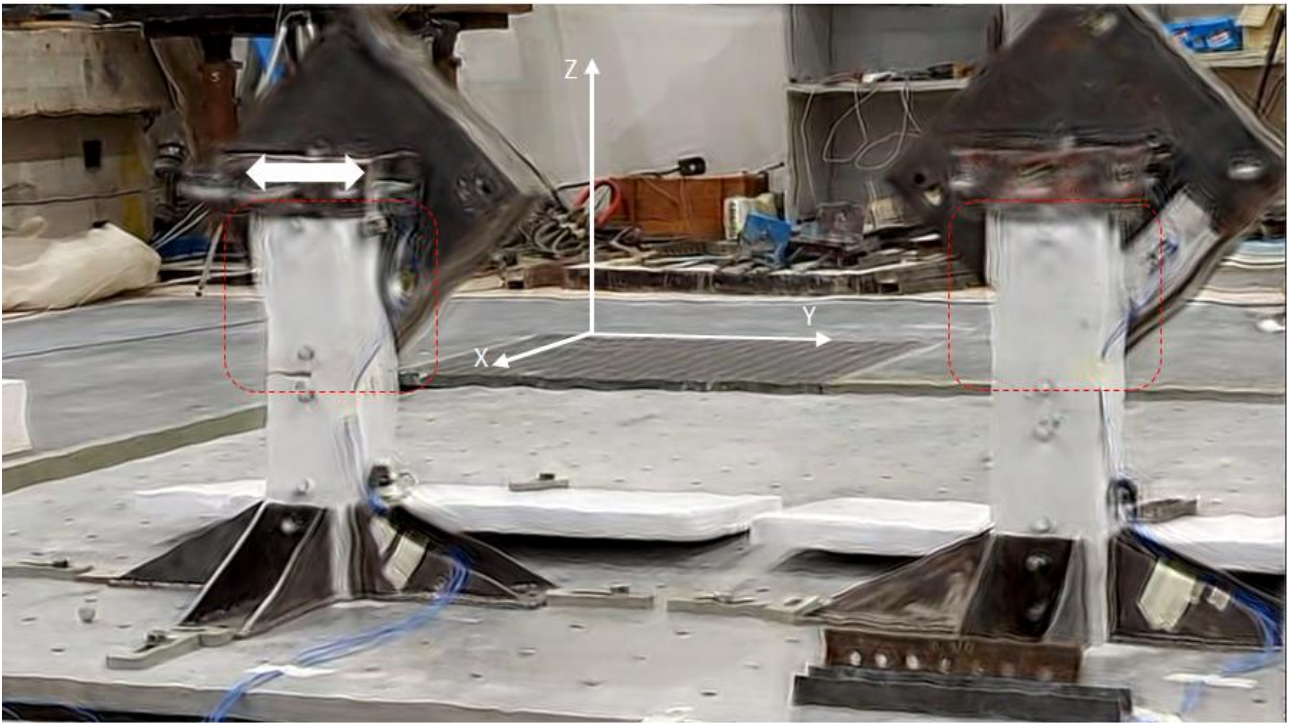


Figura 41. Amplificazione $A = 60$, range di frequenze 3,5 – 6,5 Hz. Il moto si svolge sul piano Y – Z.

5.5.2. Analisi delle basse frequenze e bassa intensità di sollecitazione

Nel caso in esame il MM ha permesso di evidenziare dalle prove sismiche a bassa intensità le aree dei pilastri sottoposte a maggiore stress. La concordanza delle analisi visuali dei video ad alta intensità vibrazionale permette, tra l'altro, di effettuare valutazioni qualitative predittive sulla stabilità dell'assemblaggio prima di arrivare al collasso.

In Figura 42 il frame del video relativo al test sismico a bassa intensità precedente la frattura del pilastro tradizionale mostra nel riquadro tratteggiato la deformazione subita dal pilastro, similmente a quanto avviene in Figura 41. Mentre il range di frequenze è identico, 3,5 – 6,5 Hz, la amplificazione di Figura 42 è doppia, perché le vibrazioni del test a bassa intensità producono piccolissimi spostamenti dei pilastri, e pertanto si è resa necessaria una amplificazione maggiore. Un ulteriore incremento della amplificazione avrebbe evidenziato ancora meglio le differenze tra i due pilastri, ma a scapito della leggibilità complessiva del video. La concordanza delle analisi dei video ad alta e a bassa intensità vibrazionale permette comunque affidabili valutazioni sulla stabilità della struttura.

Nella parte inferiore di Figura 43 relativa al test di bassa intensità, si notano le regioni di bordo a maggior dislocazione secondo il codice a colori a destra (rosso dislocazione massima); le aree senza *texture* o senza contorni definiti non sono ben individuate dall'algoritmo, che invece rileva invece facilmente il moto lungo le superfici limite. Notare che non si considerano gli spostamenti in assoluto, ma solo quelli di più rilevante entità. E' chiaro che i blocchi della zavorra di sinistra sono molto sollecitati rispetto ad altre aree nella immagine, come mostra il riquadro tratteggiato indicato dalla freccia. Il moto si svolge in coerenza con quello visto nella Figura 42 sul piano X – Z , ed è di intensità decisamente superiore rispetto a quello sul piano Y – Z. Qui l'amplificazione $A = 150$ è molto elevata in quanto il test è a bassa intensità, e pertanto necessita di una tale amplificazione per poter evidenziare movimenti che sono piccoli nella loro reale entità.

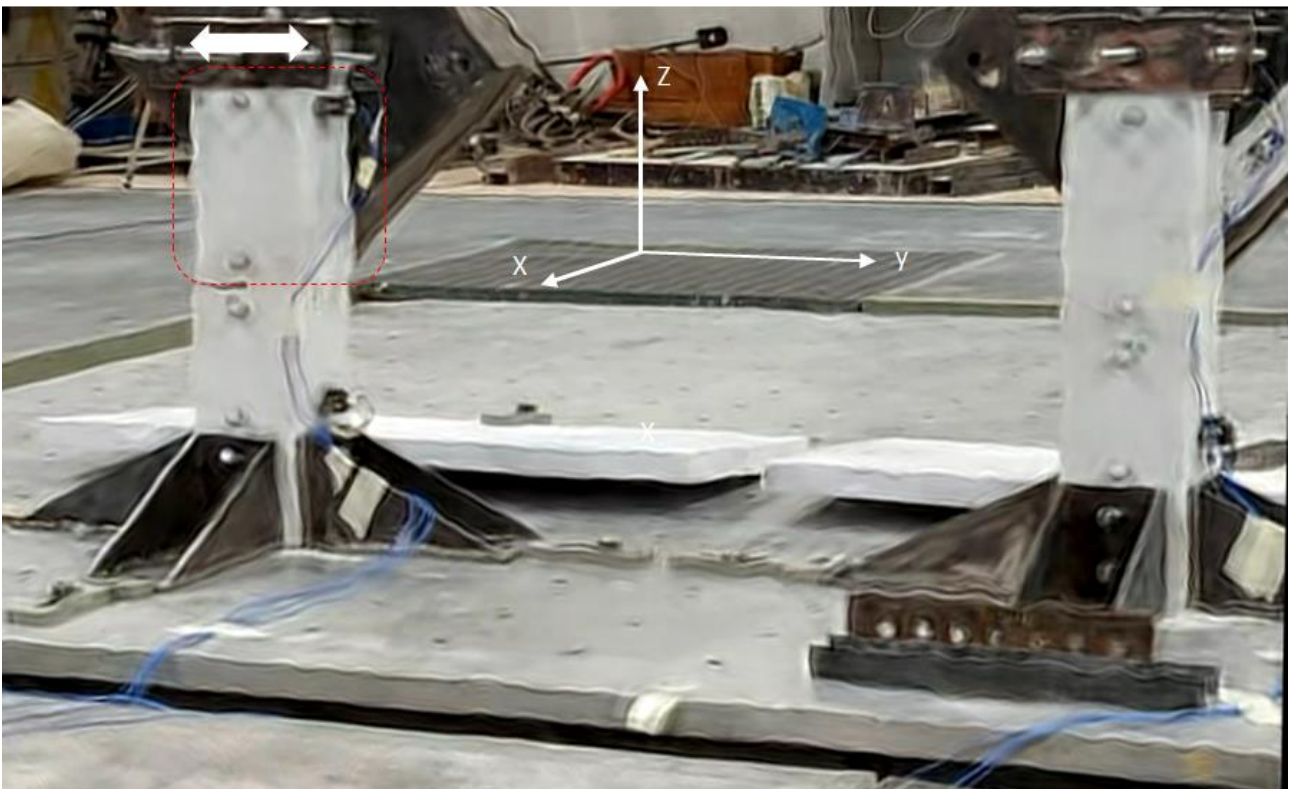


Figura 42. Amplificazione $A = 150$, range di frequenze 3,50 – 6,50 Hz. Frame dal video relativo al test sismico a bassa intensità.

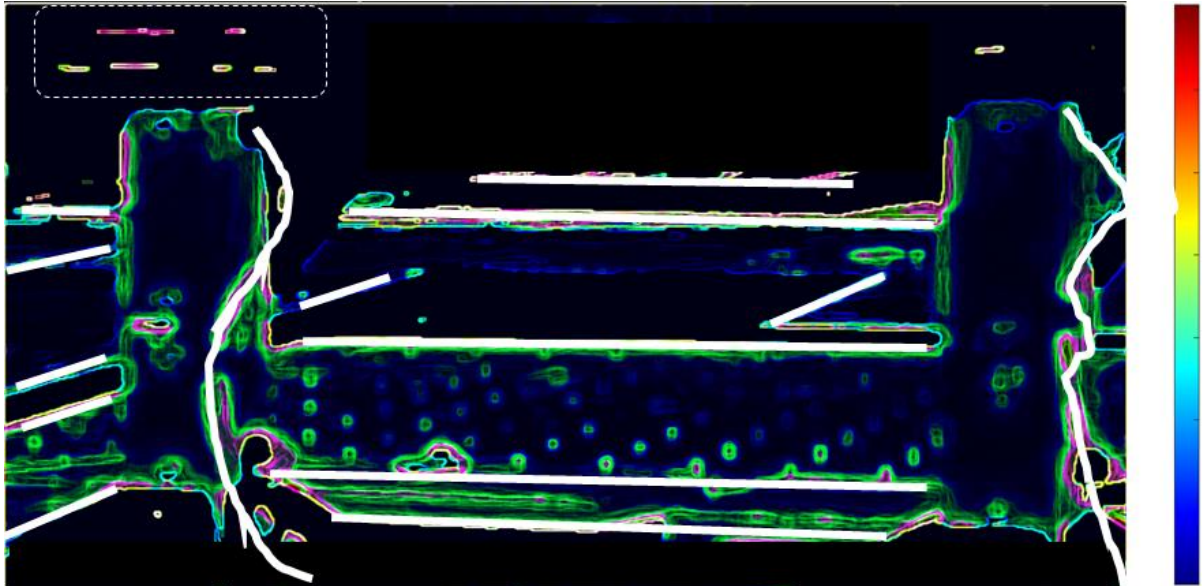


Figura 43. I pilastri all’inizio del test. Sotto: spostamenti rilevati nel test a bassa intensità, con $A = 150$, range 2,5-6,5 Hz secondo il codice colore a destra. Nel riquadro tratteggiato l’area a maggior dislocazione dei due pilastri; notare i cavi ed i bordi sollecitati indirettamente dalla tavola vibrante evidenziati in colore bianco, il cui movimento ha ostacolato l’algoritmo introducendo rumore.

5.5.3. Analisi delle medie frequenze e bassa intensità di sollecitazione

Nel range di frequenze 6 – 10 Hz è possibile rilevare le solite deformazioni nel pilastro di sinistra nella Figura 44, seppure meno accentuate rispetto al caso delle basse frequenze.

5.5.4. Analisi delle alte frequenze e bassa intensità di sollecitazione

Nel test a bassa intensità ed alta frequenza di Figura 45 con $A = 150$, range di frequenza 11 – 14 Hz, non si osservano particolari differenze di oscillazione tra i due pilastri. Probabilmente, innalzando la amplificazione della magnificazione (il parametro A), si potrebbero osservare differenze apprezzabili. Tuttavia la qualità dei video di magnificazione si deteriorerebbe eccessivamente.

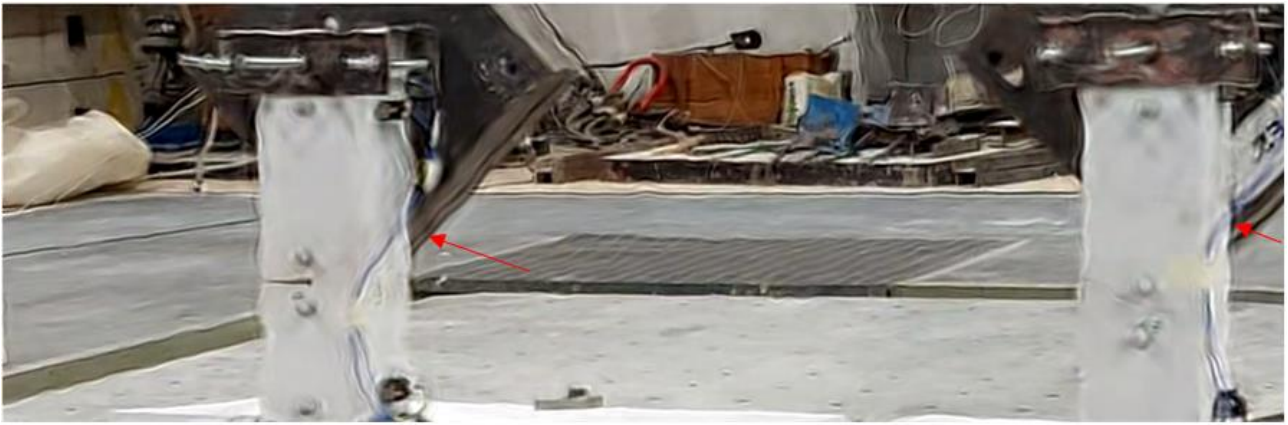


Figura 44. Frame del test a bassa intensità, con A=150 range di frequenza 6 – 10 Hz.

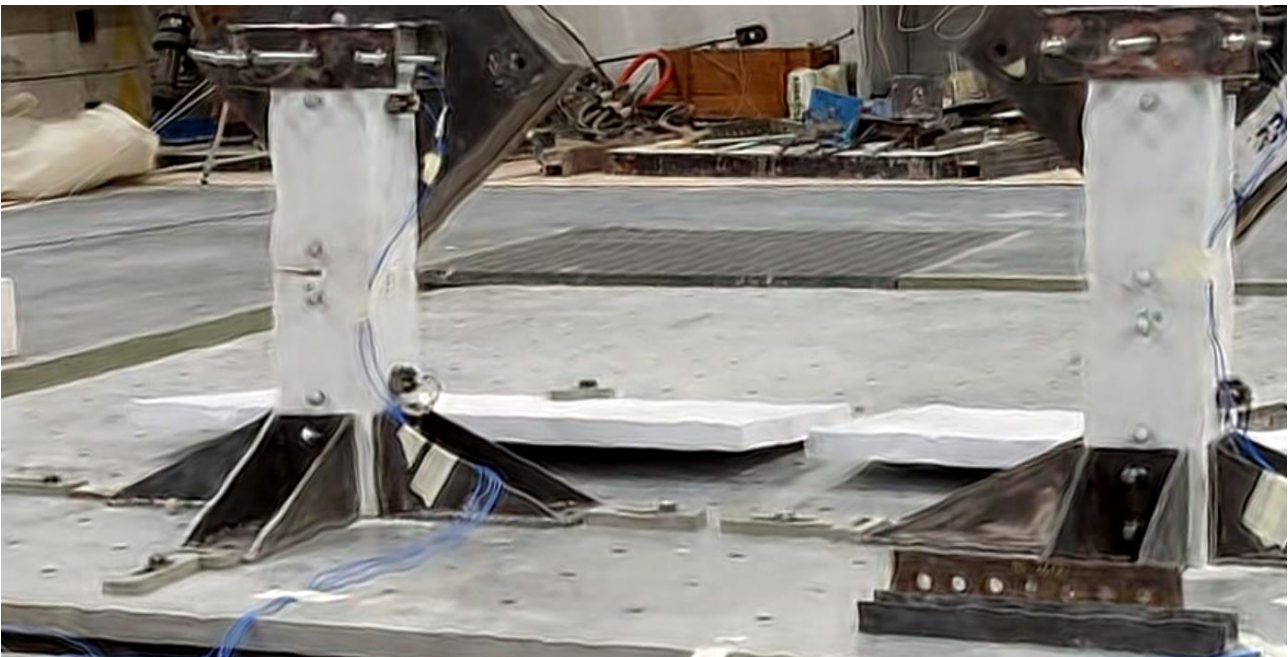


Figura 45. Frame del test a bassa intensità, A=150 range di frequenza 11 – 14 Hz.

6. Conclusioni

Alla fine della realizzazione del programma sperimentale sono state eseguite tutte le misure e le analisi previste nel paragrafo 5.1, le quali hanno fornito indicazioni significative ai fini della verifica dell'efficacia dell'innovativo metodo RestArt per la ricomposizione di frammenti lapidei nell'ambito del restauro di elementi architettonici e di statue.

Le misure PnD con martello sonico sui provini prima della partenza dal laboratorio di Ma.Co.Rè. e poi all'arrivo presso il laboratorio ENEA del C.R. Casaccia (circa 40 km su percorso misto urbano-extraurbano) hanno dimostrato che un usuale trasporto non ha compromesso l'integrità dei provini ricomposti. Le successive prove su tavola vibrante,

quindi, sono da considerarsi rappresentative dei frammenti ricomposti in condizioni di assenza di danneggiamento.

Dalle tre batterie di prove distruttive su tavola vibrante, denominate PROVA 1, PROVA 2 e PROVA 3, come descritto nel capitolo 2, si possono trarre le seguenti conclusioni.

La PROVA 1 mostra che il provino costituito da frammenti in travertino ricomposti con un perno eseguito con metodo RestArt si è rivelato più resistente dell'analogo provino realizzato con metodo tradizionale alla vibrazione sismica di un tipico terremoto di forte intensità che può colpire il territorio italiano (sulla base della registrazione di una delle più forti scosse della sequenza sismica dell'Italia Centrale 2016-2017). In nessuno dei due provini la frattura imperniata si distacca con caduta del frammento ricomposto, ma nel provino tradizionale le misure rilevano un danneggiamento molto grave mentre nel provino realizzato con metodo RestArt non si rileva pressoché nessun danneggiamento.

La PROVA 2 ha mostrato che il provino costituito da frammenti in marmo di Carrara ricomposti con un perno eseguito con metodo RestArt si è rivelato meno vulnerabile dell'analogo provino realizzato con metodo tradizionale alla vibrazione da trasporto su percorso accidentato e, in particolare, utilizzando un tipico furgone che percorre ad alta velocità una strada che presenta buche di rilevante entità. In nessuno dei due provini la frattura imperniata si distacca con caduta del frammento ricomposto, ma nel provino tradizionale le misure rilevano un danneggiamento significativamente più precoce e avanzato rispetto al provino realizzato con metodo RestArt.

Infine, la PROVA 3 quantifica la maggiore resistenza dei provini ricomposti con il metodo RestArt tramite l'impiego di 3 perni rispetto all'utilizzo di un solo perno. Si deve sottolineare che la configurazione di test e l'input sismico sintetico della PROVA 3 sono notevolmente più onerosi rispetto alla PROVA 1 e alla PROVA 2. Il provino con un solo perno, pur resistendo bene senza alcun danneggiamento rilevato fino a sollecitazioni molto intense, quando sollecitato a vibrazioni sismiche superiori a 1 g di PGA, ha iniziato a sviluppare un danneggiamento interno a partire da una fessura impostata sull'unico perno presente che evidentemente costituisce inevitabilmente il punto debole dell'intero provino. La rottura finale con distacco dell'imperniaggio, ad ogni modo, avviene a 2.5 g di PGA, un livello di accelerazione sismica elevatissimo, confrontabile con i livelli più alti mai registrati in un terremoto naturale. Il provino realizzato con 3 perni, invece, non concentrando le tensioni su un punto debole, si rivela ancora più resistente, non mostrando nessun danneggiamento, né visivo, né strumentale, fino alla rottura improvvisa con strappo

dell'impenniaggio che si verifica solo a 4.5 g di PGA, ovvero a livelli di accelerazione pressoché doppi rispetto al provino con un solo perno. Questa soluzione, quindi, non solo si dimostra più resistente di quella con un solo perno, ma anche più sicura e protettiva per l'incolumità del provino nel suo complesso. Tale risultato va anche considerato come di ulteriore miglioramento nel confronto con il metodo tradizionale, visto che il metodo tradizionale a 3 perni è estremamente più difficile da realizzare praticamente.

Le analisi eseguite con l'elaborazione dei filmati con la tecnica del Moto Magnificato confermano i risultati raggiunti con le misure accelerometriche e con il sistema di motion capture 3D, riuscendo a visualizzare la dinamica del comportamento dei provini soggetti alle prove su tavola vibrante, costituendo così una sorta di mutua validazione dei risultati e rendendo ulteriormente solide le conclusioni a cui si è pervenuto sulla valutazione della maggiore resistenza ed efficacia dell'impenniaggio innovativo a 3 perni effettuato con la tecnica sviluppata nel progetto RestArt.

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
www.enea.it

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati
marzo 2021