

Laboratori Eucentre

Collaudo del Laboratorio Mobile

Davide Bolognini¹, Filippo Dacarro² ■

La realizzazione del Laboratorio Mobile, inaugurato a metà marzo di quest'anno, è probabilmente da annoverare fra le attività più impegnative e particolari dell'ultimo periodo, come del resto fuori dell'ordinario è la sua finalità: effettuare, mediante un equipaggiamento totalmente autonomo, prove dinamiche in situ sia su strutture reali, per esempio edifici e ponti, sia su terreni. Il progetto può aprire nuove strade e possibilità sul fronte delle indagini e su quello delle tecniche d'intervento, poiché consentirebbe di studiare la risposta dinamica di una struttura reale e dei suoi componenti, inclusi gli elementi non strutturali nel caso di un edificio, con le loro peculiari caratteristiche fisico-meccaniche e nel loro effettivo stato di conservazione, tenendo presente che, al fine di imporre l'eccitazione dinamica esterna, è opportuno che la struttura sia resa indipendente dal terreno. Le prove sono tecnicamente ripetibili, tanto che l'efficacia di un eventuale intervento di rinforzo potrebbe essere sia valutata sperimentalmente, sia monitorata nel corso del tempo. L'approfondita conoscenza delle caratteristiche dinamiche e l'individuazione degli elementi maggiormente critici, inoltre, permetterebbero di ricalibrare accuratamente un modello numerico a elementi finiti.

Il progetto di un simile sistema richiede una conoscenza piuttosto precisa circa le caratteristiche delle tipologie strutturali potenziali oggetto di prova, dell'input sismico che potrebbe ragionevolmente essere usato come riferimento, delle eventuali configurazioni di prova mediante le quali imporre l'eccitazione dinamica esterna. I parametri fondamentali (Tabella 1) possono essere valutati individuando i requisiti minimi in grado di indurre un livello di danno significativo sulle strutture. Il relativo dominio di capacità è simile a quello di una tavola vibrante, in cui le prestazioni di picco in termini di spostamento, velocità ed accelerazione sono correlate e limitate fra loro in funzione sia della frequenza dell'input dinamico, sia della massa del provino (Figura 1). Per fare un esempio pratico, si prevede di poter coprire spostamenti di ampiezza massima pari a ± 250 mm con una velocità di picco di 500 mm/s e di imporre un'accelerazione di almeno 0.6 g su di un provino di massa 500 t o, alternativamente, di superare 1 g con una massa di 150 t.

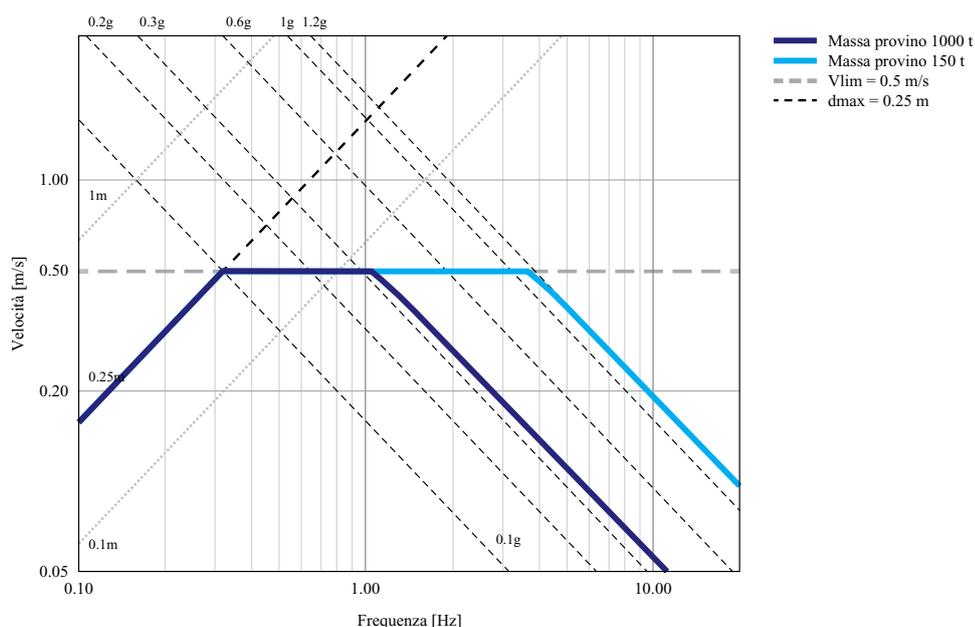


Figura 1
Curva di capacità
accelerazione-velocità-
spostamento del sistema di
prova.

¹ Eucentre - Dipartimento Experimental Activities, Pavia, Italia - davide.bolognini@eucentre.it

² Eucentre - Direttore Dipartimento Experimental Activities, Delegato responsabile dei Laboratori, Pavia, Italia - filippo.dacarro@eucentre.it



Figura 2
 Immagini riguardanti:
 l'autoarticolato per il trasporto del sistema di prova e, in primo piano, il generatore di corrente (in alto); il sistema di pompe, accumulatori, impianto di raffreddamento e linea di distribuzione (a destra); particolare dell'attacco dei cavi di distribuzione (a sinistra); il dettaglio del sistema di attuatori e di una trave in acciaio per "l'impacchettamento" delle masse di base tramite post-tensione (in basso).



INCENTRE

R
Q
P
O

H
G
F
E
D
C

5 6 7 8 9

Tabella 1 - Laboratorio Mobile: caratteristiche principali

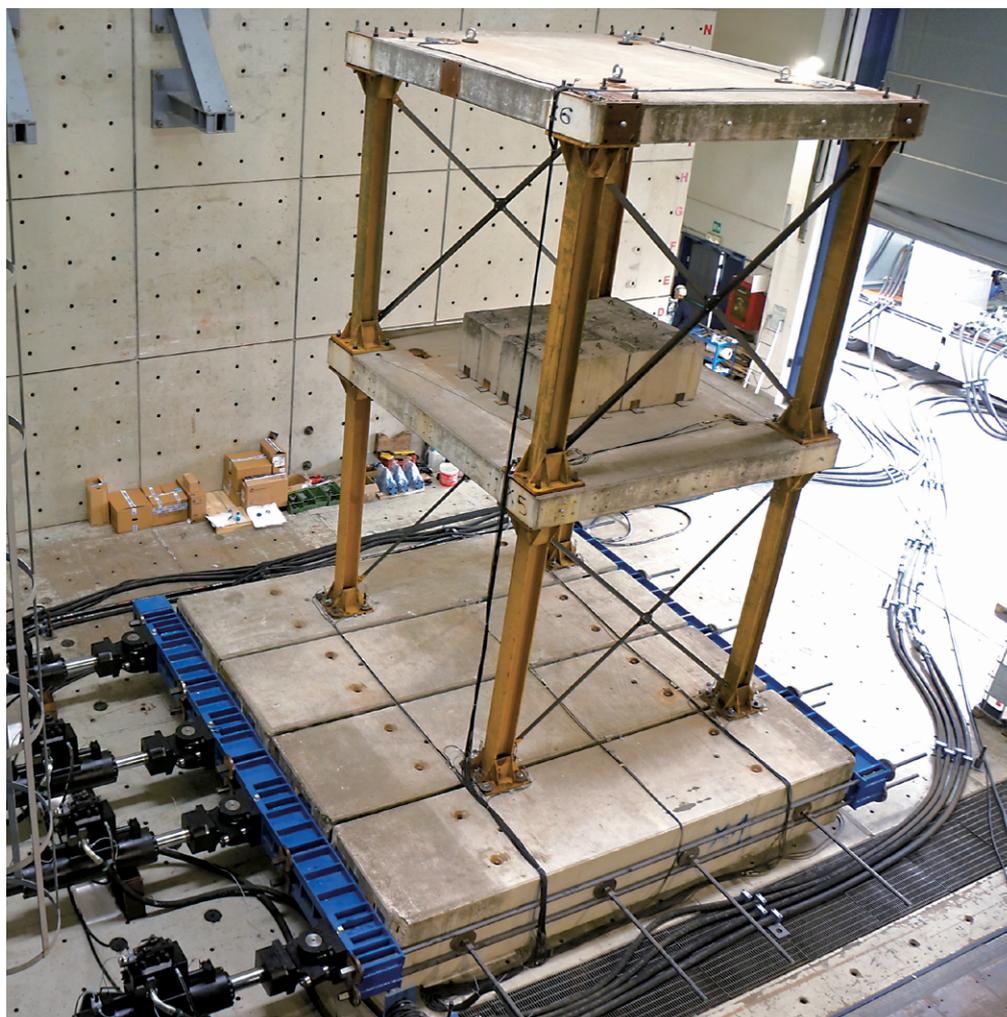
| | |
|---|------------|
| Spostamento massimo | ± 250 mm |
| Velocità massima | 500 mm/s |
| Accelerazione massima (con provino da 150 t) | 1.2 g |
| Portata olio massima | 6000 l/min |
| Forza statica massima (con 4 attuatori) | 4000 kN |
| Forza dinamica massima | 3600 kN |
| Massa massima per provino | 1000 t |
| Potenza elettrica | 600 kW |
| Pressione in esercizio | 280 bar |
| Volume di accumulo | 700 l |
| Pressione di pre-carica del sistema di accumulo | 210 bar |

Il sistema di prova, così come concepito al termine delle fasi progettuali, è composto da quattro attuatori oleodinamici da 1000 kN ciascuno, dotati di relativo impianto idraulico da 6000 l/min a 280 bar (composto da pompe, serbatoio, gruppi di accumulo, unità di raffreddamento e linee di distribuzione) trasportati mediante un autoarticolato, da un imponente generatore di corrente elettrica da 600 kW e da un controller digitale appositamente installato su di un'unità mobile (Figura 2 nella pagina precedente). All'occorrenza, l'apparato del Laboratorio Mobile può essere collegato alla linea di distribuzione degli altri laboratori, incrementandone ulteriormente le prestazioni.

Il collaudo è stato realizzato mediante una prova che, per svariati motivi, si è deciso di effettuare in laboratorio adottando una configurazione appositamente studiata per simulare, per quanto possibile, le condizioni reali in situ e riprodurre le problematiche più comuni relative all'assemblaggio, al funzionamento ed all'impegno dell'intero apparato.

In dettaglio, la configurazione di prova adottata è costituita dagli attuatori che, impostati su muri di riscontro, impongono una storia di accelerazioni a una massa isolata alla base supportante un telaio di due piani (Figura 3). La massa è composta da quattro blocchi in c.a. post-tesi, ciascuno di dimensioni 5400 x 1300 x 900(h) mm, ha un peso totale di circa 60 t ed è isolata

Figura 3
Veduta dall'alto del sistema di prova: impianto, attuatori, masse isolate alla base e telaio di due piani.



alla base mediante otto dispositivi in PTFE ingrassato (due per ogni blocco) poggianti su piastre metalliche 750 x 750 mm di spessore 50 mm. La post-tensione è applicata in direzione longitudinale e trasversale rispettivamente con 10 + 4 barre Dywidag $\phi 40$ mm (diametro nominale) esterne alle masse. Due grandi travi calastrellate in acciaio poste ai lati delle masse sono parte integrante del sistema di post-tensione e permettono non solo di distribuire uniformemente le forze applicate dagli attuatori, ma anche di esercitare azioni sia di spinta, sia di richiamo dell'intero sistema. Il telaio è realizzato con quattro colonne HE200B alte circa 3000 mm per piano, controventate con diagonali a L da 50 mm solo in direzione longitudinale, e da due solai in calcestruzzo armato di dimensioni 3500 x 3850 x 300(h) mm aventi una massa di circa 10 t ciascuno. Sul primo solaio, inoltre, sono posti blocchi in calcestruzzo per circa 4 t di massa aggiuntiva in modo da allungare leggermente il periodo atteso del sistema (Tabella 2).

È opportuno enfatizzare il fatto che il test riguarda contemporaneamente due "soggetti". Uno è il prototipo rappresentato dalla massa isolata e dal telaio tirafondato ad essa, opportunamente dimensionato ed assemblato; l'altro, il più importante, è costituito dal sistema controller-attuatori-impianto, anch'esso adeguatamente progettato e realizzato, di cui s'intende valutare le criticità e verificarne sia il funzionamento, sia parte delle prestazioni attese.

Tabella 2 - Periodi principali di vibrazione e masse partecipanti del telaio vincolato alle masse di base

| Modo | Periodo | Frequenza | Massa partecipante | | | |
|------|---------|-----------|--------------------|------------|-----------|-------------|
| | | | X (Long.) | Y (Trasv.) | Z (Vert.) | RZ (Rotaz.) |
| [s] | [Hz] | [%] | [%] | [%] | [%] | [%] |
| 1 | 0.395 | 2.53 | 0 | 92 | 0 | 0 |
| 2 | 0.175 | 5.71 | 0 | 0 | 0 | 91 |
| 3 | 0.138 | 7.25 | 90 | 0 | 0 | 0 |

L'input sismico appositamente selezionato è costituito da due accelerogrammi di cui nelle Figure 4 e 5 sono rappresentate le componenti longitudinali ed i relativi spettri in accelerazione e spostamento al 2% di smorzamento. Le due differenti configurazioni degli attuatori (Figura 6) consentono di studiare non solo la risposta monoassiale e quella bidirezionale del provino, ma anche le problematiche associate al funzionamento dell'impianto.

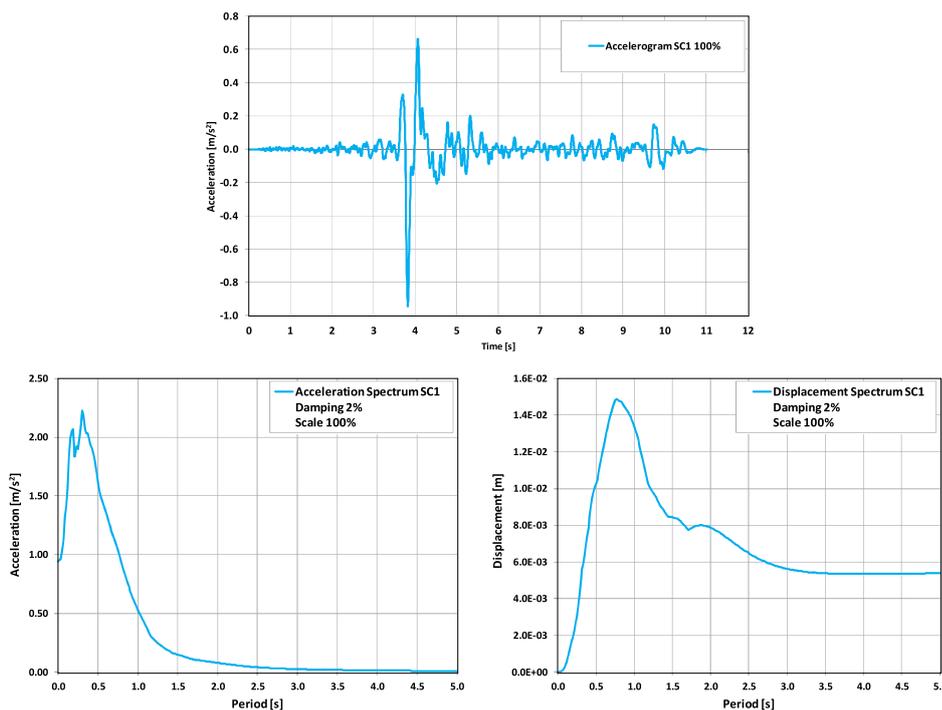


Figura 4
Componente longitudinale X dell'accelerogramma SC1 scalato al 100% e relativi spettri in accelerazione e in spostamento al 2% di smorzamento.

Figura 5
 Componente longitudinale X
 dell'accelerogramma SC2
 scalato al 100% e relativi
 spettri in accelerazione e
 in spostamento al 2% di
 smorzamento.

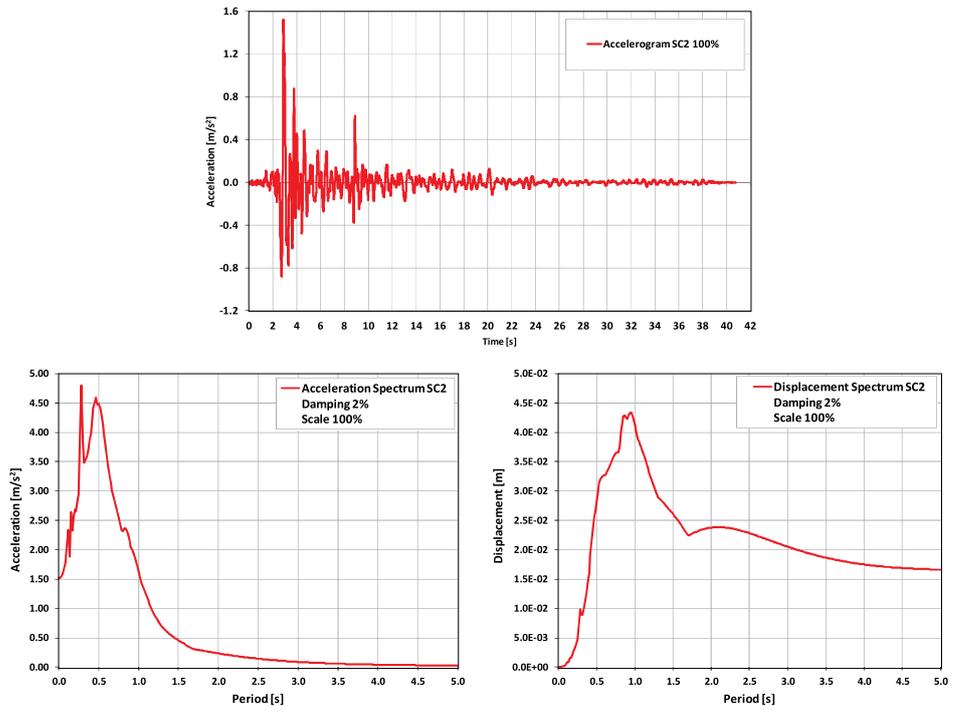
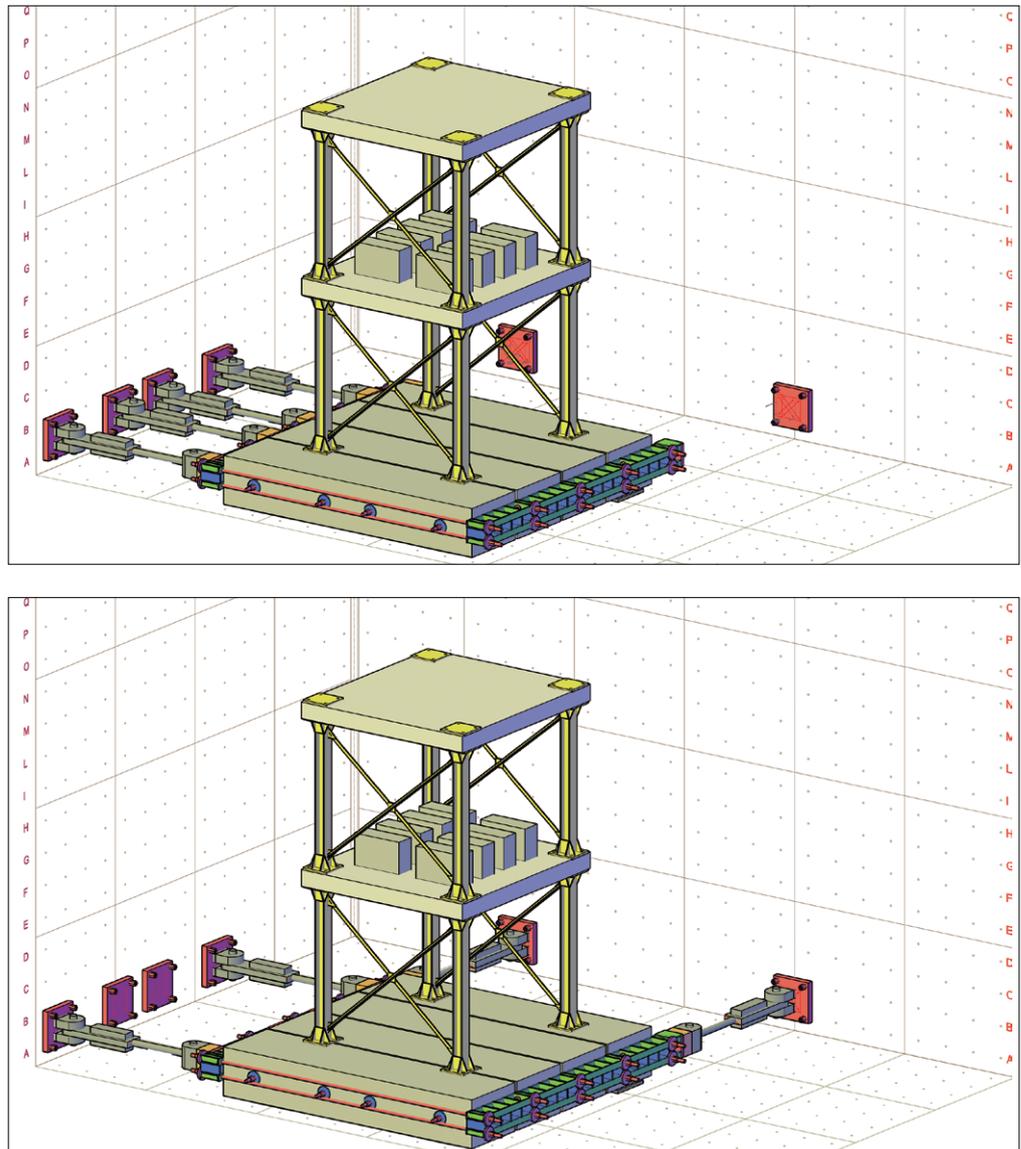


Figura 6
 Sistema di prova:
 configurazione 1 a
 quattro attuatori in linea e
 configurazione 2 con attuatori
 lungo le due direzioni
 ortogonali nel piano.



Definito l'input sismico, si è previsto di limitare la risposta dinamica del telaio al solo campo elastico. Poiché essa è facilmente stimabile in tempo reale anche attraverso un modello semplificato, il confronto fra il valore numerico atteso e quello sperimentale fornisce una misura diretta ed immediata del buon esito della prova e del livello di controllo che si ha su di essa. Per tale motivo, dopo aver studiato molteplici configurazioni del telaio utilizzando come parametri la distribuzione delle masse e delle rigidità, si è optato per quella precedentemente descritta, caratterizzata da una risposta asimmetrica lungo le due direzioni ortogonali e associata, inoltre, ad una sufficiente capacità in termini sia di resistenza a taglio e a flessione degli elementi e dei collegamenti, sia di spostamento nei confronti degli effetti dei due accelerogrammi amplificati fino al 350%.

La verifica sperimentale dell'apparato di prova, dipendente da svariati parametri, è molto più complessa. Innanzi tutto, l'assemblaggio e la relativa messa in funzione, aspetti già di per sé non propriamente banali, sono operazioni che devono essere ripetute ogni qualvolta si affronta una nuova prova in situ. Per quanto riguarda il test di collaudo, invece, sono stati indagati l'affidabilità del controller (discrepanza fra segnale di riferimento e relativo feedback), la risposta dei dispositivi di isolamento alla base (minimizzazione del livello di attrito) ed il funzionamento degli attuatori, contraddistinto da un elevato numero di variabili. Delle problematiche relative agli attuatori, ci limitiamo a menzionare la necessità di garantire, attraverso l'impianto, un flusso d'olio necessario ad imporre la storia di accelerazione prevista (in Figura 7 è riportato il volume d'olio calcolato per applicare gli accelerogrammi SC1 e SC2 scalati al 400% della loro intensità nominale), la verifica della pressione effettiva nelle due camere degli attuatori al fine di garantire la forza necessaria, il controllo del livello di spostamento effettivo, il sincronismo ed il funzionamento combinato, il possibile effetto di serpeggiamento e l'eventuale rotazione della massa di base durante la configurazione in linea.

I test effettuati sono riassunti in Tabella 3 in funzione della configurazione degli attuatori (prova monoassiale o bidirezionale), dell'accelerogramma utilizzato, del fattore di scala adottato (la massima accelerazione alla base applicata è stata di 0.54 g con un'amplificazione ai piani superiore a 3). Le informazioni sperimentali ottenute sono al momento in fase di elaborazione, per cui i risultati dettagliati sono rimandati alle prossime pubblicazioni. In questa sede anticipiamo il confronto fra il segnale di reference e quello di feedback in termini di spettro di risposta (Figura 8) di alcuni test monodirezionali al fine di dimostrare, almeno parzialmente e per ora, il buon livello di affidabilità della prova sviluppata. Questo è un aspetto rilevante, perché solitamente il controllo della forza in situ, pur non essendo un fattore limitante, non ha esattamente lo stesso elevato livello di affidabilità che contraddistingue le prove di laboratorio.

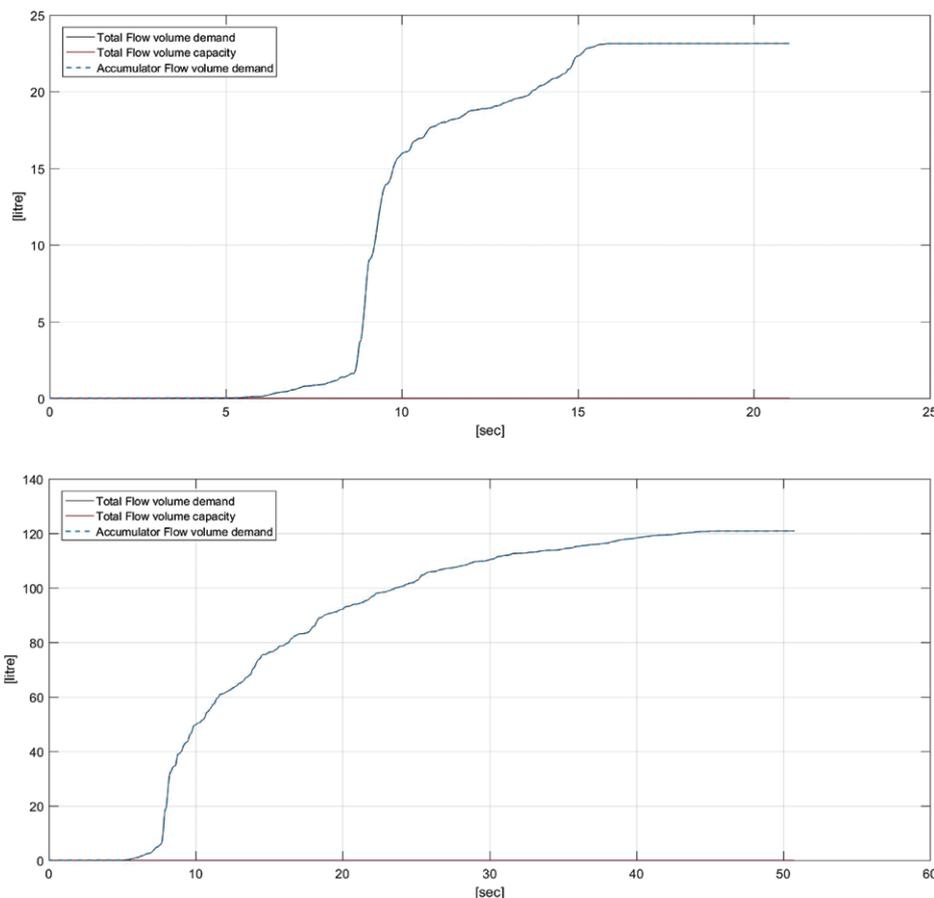


Figura 7

Flusso d'olio stimato per imporre alla struttura gli accelerogrammi SC1 (in alto) e SC2 (in basso) scalati al 400% del loro valore nominale.

In Figura 9, infine, sono indicate le frequenze proprie valutate preliminarmente attraverso la trasformata di Fourier sulla verticale di una colonna per il test monodirezionale n. 1 sfruttando un segnale costituito da un'accelerazione random a frequenza costante; si confronti il valore della prima frequenza con quello riportato in Tabella 2 relativamente alla direzione longitudinale X. Verifiche di questo tipo sono state fatte ripetutamente lungo le due direzioni ortogonali del piano, anche al fine di rilevare eventuali danneggiamenti, soprattutto a livello delle connessioni alla base e ai piani.

Tabella 3 - Riassunto dei test eseguiti durante il collaudo del Laboratorio Mobile

| Prove Monoassiali (Direzione Longitudinale X) | | | |
|---|-------------------------------------|---------|-----------|
| Nome prova | Accelerogramma | PGA [g] | Data |
| 1 RNDM 01 | Segnale random ad ampiezza costante | - | 12-mar-18 |
| 2 Compensata_150a | SC1 scalato 150% | 0.144 | 12-mar-18 |
| 3 Compensata_150b | SC1 scalato 150% | 0.144 | 12-mar-18 |
| 4 Compensata_150c | SC1 scalato 150% | 0.144 | 12-mar-18 |
| 5 Compensata_150aa | SC1 scalato 150% | 0.144 | 12-mar-18 |
| 6 Compensata_150bb | SC1 scalato 150% | 0.144 | 12-mar-18 |
| 7 Compensata_150cc | SC1 scalato 150% | 0.144 | 12-mar-18 |
| 8 Compensata_200a | SC1 scalato 200% | 0.192 | 12-mar-18 |
| 9 Compensata_200b | SC1 scalato 200% | 0.192 | 12-mar-18 |
| 10 Compensata_200c | SC1 scalato 200% | 0.192 | 12-mar-18 |
| 11 Compensata_50a | SC2 scalato 50% | 0.077 | 12-mar-18 |
| 12 Compensata_80a | SC2 scalato 80% | 0.124 | 12-mar-18 |
| 13 Compensata_80b | SC2 scalato 80% | 0.124 | 12-mar-18 |
| 14 Compensata_100a | SC2 scalato 100% | 0.155 | 12-mar-18 |
| 15 Compensata_100b | SC2 scalato 100% | 0.155 | 12-mar-18 |
| 16 Compensata_100c | SC2 scalato 100% | 0.155 | 12-mar-18 |
| 17 Compensata_100d | SC2 scalato 100% | 0.155 | 12-mar-18 |
| 18 Compensata_150a | SC2 scalato 150% | 0.232 | 12-mar-18 |
| 19 Compensata_150b | SC2 scalato 150% | 0.232 | 12-mar-18 |
| 20 Compensata_200a | SC2 scalato 200% | 0.310 | 13-mar-18 |
| 21 Compensata_200b | SC2 scalato 200% | 0.310 | 13-mar-18 |
| 22 Compensata_200c | SC2 scalato 200% | 0.310 | 13-mar-18 |
| 23 Compensata_150aa | SC2 scalato 150% | 0.232 | 13-mar-18 |
| 24 Compensata_150bb | SC2 scalato 150% | 0.232 | 13-mar-18 |
| 25 Compensata_150cc | SC2 scalato 150% | 0.232 | 13-mar-18 |
| 26 Compensata_150dd | SC2 scalato 150% | 0.232 | 13-mar-18 |
| 27 Compensata_150ee | SC2 scalato 150% | 0.232 | 13-mar-18 |
| 28 Compensata_150ff | SC2 scalato 150% | 0.232 | 13-mar-18 |
| 29 Compensata_150gg | SC2 scalato 150% | 0.232 | 13-mar-18 |
| 30 Compensata_150hh | SC2 scalato 150% | 0.232 | 13-mar-18 |
| 31 RNDM 02 | Segnale random ad ampiezza costante | - | 13-mar-18 |
| 32 Compensata_150ii | SC2 scalato 150% | 0.232 | 13-mar-18 |
| 33 Compensata_200a | SC2 scalato 200% | 0.387 | 13-mar-18 |
| 34 Compensata_200b | SC2 scalato 200% | 0.310 | 13-mar-18 |
| 35 Compensata_250a | SC2 scalato 250% | 0.387 | 13-mar-18 |
| 36 Compensata_300a | SC2 scalato 300% | 0.465 | 13-mar-18 |
| 37 Compensata_300b | SC2 scalato 300% | 0.465 | 13-mar-18 |
| 38 Compensata_300c | SC2 scalato 300% | 0.465 | 13-mar-18 |
| 39 Compensata_300d | SC2 scalato 300% | 0.465 | 13-mar-18 |
| 40 Compensata_350a | SC2 scalato 350% | 0.542 | 13-mar-18 |

| Prove Bidirezionali (Long. X Princ., Trasv. Y Second.) | | | | |
|--|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Nome prova | Accelerogrammi | PGA X [g] | PGA Y [g] | Data |
| 1 RNDM 03 | Segnale random ad ampiezza costante | - | - | 15-mar-18 |
| 2 Compensata _50a | SC2_X_50%, SC2_Y_25% | 0.077 | 0.039 | 15-mar-18 |
| 3 Compensata _50b | SC2_X_50%, SC2_Y_25% | 0.077 | 0.039 | 15-mar-18 |
| 4 Compensata _75a | SC2_X_75%, SC2_Y_37.5% | 0.116 | 0.058 | 15-mar-18 |
| 5 Compensata _100a | SC2_X_100%, SC2_Y_12.5% | 0.155 | 0.019 | 16-mar-18 |
| 6 Compensata _150a | SC2_X_150%, SC2_Y_18.75% | 0.232 | 0.029 | 16-mar-18 |
| 7 RNDM 04 | Segnale random ad ampiezza costante | - | - | 16-mar-18 |
| 8 Compensata _150b | SC2_X_150%, SC2_Y_18.75% | 0.232 | 0.029 | 16-mar-18 |
| 9 Compensata _200a | SC2_X_200%, SC2_Y_25% | 0.310 | 0.039 | 16-mar-18 |
| 10 Compensata _250a | SC2_X_250%, SC2_Y_31.25% | 0.387 | 0.048 | 16-mar-18 |
| 11 Compensata _250b | SC2_X_250%, SC2_Y_31.25% | 0.387 | 0.048 | 16-mar-18 |
| 12 Compensata _250c | SC2_X_250%, SC2_Y_31.25% | 0.387 | 0.048 | 16-mar-18 |
| 13 Compensata _250Y | SC2_Y_75% | - | 0.048 | 16-mar-18 |
| 14 Compensata _300Y | SC2_Y_75% | - | 0.058 | 16-mar-18 |
| 15 Compensata _300a | SC2_X_300%, SC2_Y_37.5% | 0.465 | 0.058 | 16-mar-18 |
| 16 Compensata _300b | SC2_X_300%, SC2_Y_37.5% | 0.465 | 0.058 | 16-mar-18 |
| 17 Compensata _350a | SC2_X_350%, SC2_Y_43.75% | 0.542 | 0.068 | 16-mar-18 |
| 18 Compensata _350b | SC2_X_350%, SC2_Y_43.75% | 0.542 | 0.068 | 16-mar-18 |

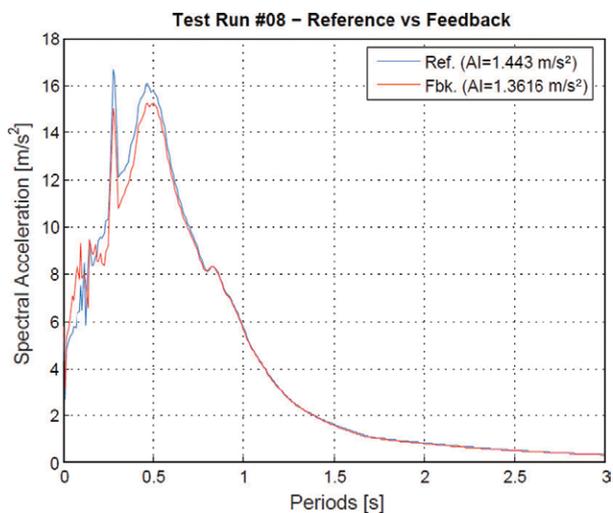
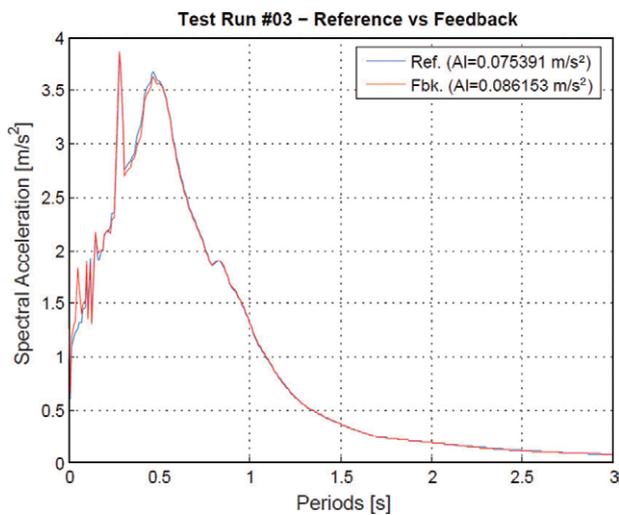
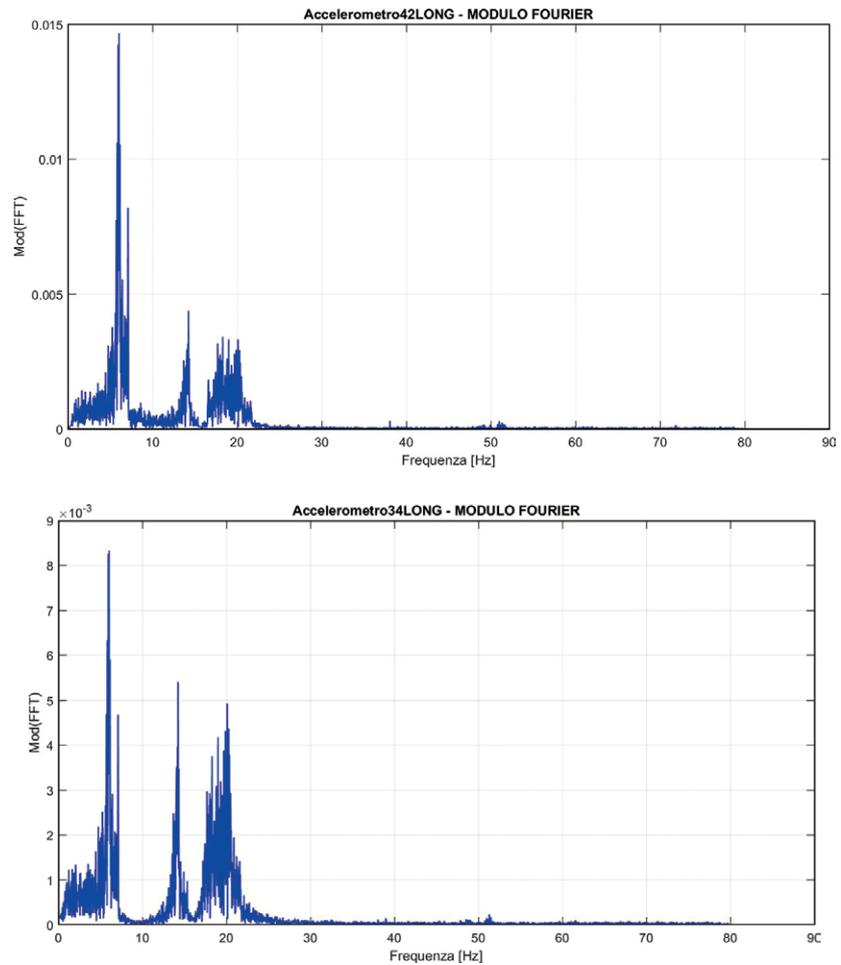


Figura 8

Confronto fra reference e feedback in termini di spettro di risposta delle prove monodirezionali n.17 e n.40, contraddistinte, rispettivamente, da un'amplificazione del 100% e del 350% dell'accelerogramma SC2.

Figura 9
 Frequenze del telaio in direzione longitudinale valutate preliminarmente al primo e al secondo piano (rispettivamente in basso e in alto) mediante accelerazione random ad ampiezza costante.



Il Sistema di prova è stato presentato al Salone del Mobile di Milano nei giorni dal 17 al 22 aprile. In quell'occasione, come si vede nella Figura 10, gli attuatori ed il relativo impianto sono stati utilizzati per movimentare un sistema costituito da una tavola da 5 m x 2.5 m supportata da una massa di riscontro isolata alla base mediante appoggi in gomma. Sulla tavola è stato allestito l'interno di un vano abitativo per simulare gli effetti del terremoto su elementi non strutturali e di arredo. Si è trattato non solo di un ulteriore test in situ del sistema dopo il collaudo fatto in laboratorio, ma anche e soprattutto della possibilità di fare opera di prevenzione nei confronti del rischio sismico.

Figura 10
 Il sistema di prova allestito presso il Salone del Mobile di Milano.

