



## Development of seismic resistant glass partitions

Gennaro Magliulo<sup>a,b</sup>, Martino Zito<sup>a</sup>, Gaetano Manfredi<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Structures for Engineering and Architecture, University of Naples Federico II, Via Claudio, 21, I-80125 Napoli, Italy

<sup>b</sup> Construction Technologies Institute, National Research Council, Via Claudio, 21, I-80125 Napoli, Italy.

*Keywords: Non-structural element, glass partition, shake table test, seismic performance, earthquake engineering.*

### ABSTRACT.

The condition of undamaged or lightly damaged internal partitions after seismic events is of utmost importance for at least three building performance levels: i) life safety, ii) operational and iii) damage. Indeed, victims may be caused by the weight of falling partitions, the obstruction of the ways out and the dust released by some (e.g. brick) partitions. Cracks and dislocations of internal partitions, which can be also caused by frequent earthquakes, may lead to the downtime of the building hosting the partitions; downtime cannot be accepted in case of strategic buildings and may lead to large losses in case of industrial and commercial buildings. Large economic losses are also related to the damage itself of the partitions. Consequently, modern seismic codes pay attention to the protection of these nonstructural elements, imposing their seismic qualification and providing strength verifications, based on accelerations, and displacement verifications, based on story drifts. Their protection also conditions the structural design: seismic codes link the stiffness of the structure to the damage of the partitions and the structural strength distribution to the possible irregular distribution of the partitions.

Contemporaneous architectural choices are leading to a large increase of the use of glass partitions, for both aesthetic and functional reasons: sound and thermic compartmentations should not be also visual barriers. Glass partitions are more and more used in offices, belonging also to strategic buildings. On the other hand, fragility, stiffness and weight of the glass sheets are features increasing the seismic vulnerability of this partition type. Consequently, the development of glass partitions, remaining operational after strong earthquakes, is an urgent need, which cannot be reached without a strong cooperation between research and industry. Indeed, glass partitions are sophisticated industrial products, characterized by a detailed and expensive manufacture of glass and either steel or aluminum.

The paper shows the development of glass partitions which remain operational after very severe earthquakes, i.e. under large accelerations and story drifts, as shown by shake table tests. Four types of partitions are developed, fully glass, glass partition with a glass door, mixed glass and steel and, finally, mixed glass and wood. It is confirmed that, as already known, simple details may largely increase the seismic performance of nonstructural elements.

### 1 INTRODUZIONE

I recenti terremoti hanno evidenziato l'enorme impatto dei componenti non strutturali sulle perdite stimate a seguito di un evento sismico (Filiatrault et al. 2001). Il terremoto di Darfield del 2010 in Nuova Zelanda ha sottolineato che anche negli edifici in cui il danno ai sistemi strutturali è modesto, i danni alle parti non strutturali e ai contenuti possono essere significativi (Dhakal 2010). In particolare i report dei terremoti recenti verificatisi in Italia e nel resto del mondo hanno sottolineato tre particolari aspetti associati al danneggiamento degli elementi non strutturali.

1. Costo: la maggior parte del costo di un edificio è legato ai componenti non strutturali, risultando pari al 92% del costo totale per gli ospedali (Taghavi and Miranda 2003).
2. Tempo di inattività: i componenti non strutturali presentano generalmente danni per bassi livelli di domanda sismica, che non causano seri danni strutturali, ma possono determinare la perdita di operatività di tali edifici, anche per un tempo prolungato.
3. Perdita di vita umana: i danni ai componenti non strutturali possono minacciare la sicurezza della vita delle

persone. Il loro danno o ribaltamento, oltre a portare in maniera diretta la perdita di vita umana, può causare l'ostruzione delle vie di fuga e/o il rilascio di polveri. Infatti, il 64% delle vittime causate dal grande terremoto Hanshin del 1995 in Giappone fu dovuto al soffocamento delle persone (Ikuta and Miyano 2011).

Il presente articolo descrive delle attività condotte nell'ambito di un progetto di ricerca finalizzato alla valutazione della capacità sismica di partizioni mobili innovative, le quali possono essere classificate come componenti architettonici non strutturali, secondo Villaverde (Villaverde 1997). Nell'ultimo decennio l'attenzione della comunità scientifica verso la valutazione sismica di componenti non strutturali è cresciuta in maniera esponenziale (Lee et al. 2007, Wang and Dai 2012, Filiatrault 1991, Soroushian et al. 2016, Retamales et al. 2013, Jenkins et al. 2016, Cosenza et al. 2014) includendo ricerche sperimentali ed analisi numeriche.

Tuttavia, appare evidente la mancanza di studi sulle prestazioni sismiche delle partizioni interne mobili (Petrone et al 2017), che, dall'altra parte, sono molto diffuse in tutto il mondo, soprattutto negli uffici; alcune applicazioni possono essere trovate anche negli aeroporti, negli ospedali e nei centri commerciali. Va anche sottolineato che queste partizioni sono caratterizzate da una particolare tecnica di costruzione, quindi, non possono essere studiate come altre tipologie di partizioni.

Nell'articolo viene descritta la campagna di prova su tavola vibrante condotta su quattro tipologie di partizioni mobili. Queste sono testate simultaneamente, in modo da ottenere un immediato confronto fra le loro prestazioni.

Il setup di prova, la definizione dell'input e la strumentazione utilizzata durante i test, sono discussi nel seguente paragrafo. Si osserva che le partizioni analizzate sono prevalentemente sensibili allo spostamento relativo nel loro piano ed alle accelerazioni fuori dal piano.

## 2 DESCRIZIONE DEL TELAIO DI PROVA, SET UP, PARTIZIONI E PROTOCOLLO DI PROVA

Le prove su tavola vibrante sono state eseguite al laboratorio del Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura dell'Università di Napoli Federico II.

Il sistema di prova (Figura 1) è composto da:

- telaio spaziale in acciaio avente la funzione di trasferire l'input sismico alle pareti

(telaio di prova);

- quattro pareti disposte sui quattro lati del test frame;
- una delle due tavole vibranti disponibili presso il laboratorio.

Il telaio di prova è composto da quattro pilasti incastrati alla base e incernierati in testa alle travi orizzontali in entrambe le direzioni, in modo da costituire un comportamento a mensola. Su queste travi grava una soletta di cemento armato avente come scopo il conferimento di una massa adeguata a simulare l'azione sismica di un generico impalcato.

Il telaio di prova è progettato per sollecitare dinamicamente il campione, sottoponendolo simultaneamente a spostamento relativo nel piano e accelerazioni fuori dal piano (Petrone et al. 2014, Magliulo et al. 2014). Massa e rigidità sono state valutate mediante un'analisi parametrica, in modo che il telaio per un valore tipico di massa ( $1.0 \text{ t/m}^2$ ) e per un accelerazione sismica corrispondente ad un terremoto frequente (periodo di ritorno pari a 50 anni) in una zona italiana ad alta sismicità, esibisse uno spostamento di interpiano pari allo 0.5%.

Il telaio di prova è progettato per rimanere in campo elastico per un input sismico bidirezionale caratterizzato da un'accelerazione spettrale di  $1.0g$ , che determina uno spostamento di interpiano adimensionalizzato dell'1.0%. Nel caso in cui venga impiegato un input sismico unidirezionale, è possibile ottenere un'accelerazione e un interstory drift più grande senza danneggiare il telaio di prova.

La tavola vibrante utilizzata ha una dimensione  $3 \times 3 \text{ m}$  ed è caratterizzata da due gradi di libertà nelle due direzioni orizzontali. Il carico utile massimo è di  $200 \text{ kN}$  con un intervallo di frequenza di  $0-50 \text{ Hz}$ , un'accelerazione di picco associata al carico utile massimo di  $1.0 \text{ g}$ , velocità di picco pari a  $1 \text{ m/s}$  e spostamento totale pari a  $500 \text{ mm}$  ( $\pm 250 \text{ mm}$ ).

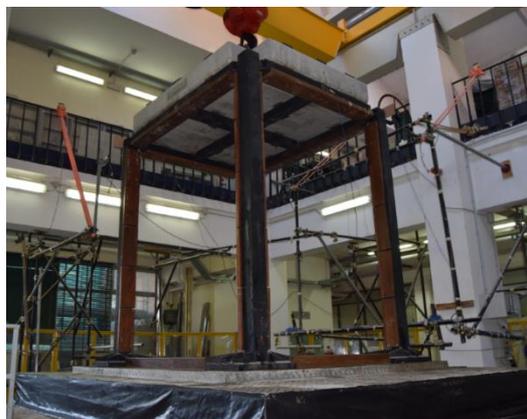


Figura 1: Vista globale del set up di prova.

## 2.1 Set up di prova e descrizione delle partizioni qualificate

La campagna sperimentale viene eseguita su quattro diverse tipologie di partizioni:

1. partizione vetrata continua;
2. partizione mista vetro-legno;
3. partizione mista vetro-acciaio;
4. partizione vetrata con porta.

Il sistema di partizione vetrata continua (Figura 2) è composto da quattro pannelli di vetro, due affiancati e due ad essi paralleli con un'intercapedine, ed ha uno spessore totale di 86 mm. I pannelli in vetro sono realizzati con vetro float stratificato con materiale plastico, ovvero in polivinilbutirrale (PVB). Questo consente alla parete di avere maggiore elasticità e quindi minore vulnerabilità durante lo scuotimento sismico. Inoltre, in caso di rottura, lo strato PVB interviene tenendo insieme gli strati di vetro che lo circondano. Quindi, anche se il vetro è danneggiato, non abbandona la sua sede evitando così di creare pericolo per oggetti o persone vicine. Lo spessore dei singoli pannelli in vetro è di 10 mm. I pannelli sono generalmente alti fino a 3 m e 1.2 m di larghezza, nel caso specifico sono stati montati pannelli di altezza 2.61 m e con larghezza 1.1 m. I vetri fra loro paralleli sono separati longitudinalmente da un profilo ad H in alluminio, in modo da creare un adeguato isolamento acustico e termico. Fra i vetri affiancati vi è un nastro biadesivo, in modo da creare un singolo elemento. La parete vetrata è posizionata all'interno di profili di alluminio fissati meccanicamente alla struttura.

La partizione mista vetro-legno (Figura 3) è costituita da una parte cieca realizzata con pannelli di rivestimento in legno e dall'altra da pannelli in vetro in continuità. In particolare, la parte cieca è costituita da sei pannelli di diverse dimensioni disposti sia lungo il fronte esterno che sulla parte interna. Ogni faccia presenta tre pannelli: due esterni con larghezza 226 mm e altezza 2570 mm e uno centrale più grande con larghezza 796 mm e altezza 2570 mm. Ogni pannello ha uno spessore di 18 mm. La parte vetrata è composta, invece, da due pannelli in vetro di larghezza 453 mm e altezza 2612 mm, e con uno spessore pari a 10 mm. Il sistema di partizione ha uno spessore totale di 86 mm.

La partizione mista vetro-acciaio (Figura 4) è identica al sistema di partizione precedente, l'unica differenza è che, invece di utilizzare dei pannelli in legno, vengono disposti dei pannelli di rivestimento in acciaio. In particolare, i pannelli in acciaio presentano uno spessore di 0.8 mm e al loro interno è presente uno strato di cartongesso di

spessore 12.5 mm. Il sistema di partizione ha uno spessore totale di 86 mm.

La partizione vetrata con porta (Figura 5) ha uno spessore totale identico ai precedenti ed è costituita da una parte vetrata e una parte relativa alla porta. Quest'ultima è composta da un telaio in acciaio e da un'anta vetrata. La porta è realizzata con doppio vetro e ha le seguenti dimensioni: larghezza 996 mm e altezza 2679 mm. La parte vetrata è composta da due pannelli in vetro paralleli di larghezza 753 mm e altezza 2612 mm, e di spessore pari a 10 mm.

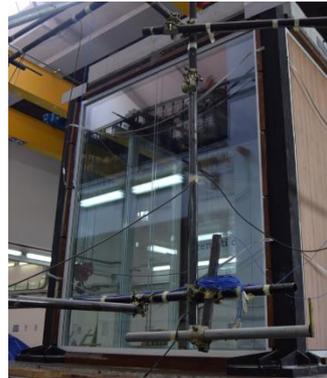


Figura 2: Partizione vetrata continua.



Figura 3: Partizione mista vetro-legno.



Figura 4: Partizione mista vetro-acciaio.



Figura 5: Partizione vetrata con porta.

## 2.2 Descrizione dell'input e del protocollo di prova

L'input alla tavola vibrante consiste in due storie temporali di 30 secondi, generate in accordo al protocollo internazionale di certificazione sismica per componenti non strutturali AC156 (ICC 2010), le quali agiscono simultaneamente lungo le due direzioni orizzontali. Le storie temporali sono definite artificialmente in modo che i loro spettri di risposta corrispondano a uno spettro di risposta target derivato dalla formulazione della forza sismica dell'American Society of Civil Engineers (ASCE/SEI 7-10 2010) per componenti non strutturali:

$$F_p = \frac{0.4 a_p S_{DS} W_p}{R_p I_p} \left(1 + 2 \frac{z}{h}\right) \leq 1.6 W_p I_p S_{DS} \quad (1)$$

dove  $a_p$  è il fattore di amplificazione di componente,  $S_{DS}$  l'accelerazione spettrale di progetto in brevi periodi,  $W_p$  è il peso del componente,  $R_p$  è il fattore di riduzione della risposta del componente,  $I_p$  è il fattore di importanza e  $z/h$  è il rapporto di altezza relativa in cui il componente è installato. Lo spettro di risposta richiesto è definito da due accelerazioni spettrali  $A_{FLX}$  e  $A_{RIG}$ :

$$A_{FLX} = S_{DS} * \left(1 + 2 \frac{z}{h}\right) \leq 1.6 S_{DS} \quad (2)$$

$$A_{RIG} = 0.4 * S_{DS} * \left(1 + 2 \frac{z}{h}\right) \quad (3)$$

$A_{FLX}$  è l'accelerazione spettrale che agisce su componenti flessibili, caratterizzati da una frequenza naturale compresa tra 1.3 e 8.3 Hz, mentre  $A_{RIG}$  è rappresentativo di componenti rigidi, cioè con frequenza naturale uguale o maggiore di 33.3 Hz. Gli spettri di risposta definiti involuppano lo spettro target nella gamma di frequenze tra 1.3 e 33.3 Hz e assumono un valore di smorzamento pari al 5% dello smorzamento critico. In questo intervallo, non superano lo spettro target di oltre il 30%. Inoltre, nei casi in cui è possibile dimostrare che non esistono fenomeni di risonanza inferiori a 5 Hz, lo spettro di input deve involuppare lo spettro target solo fino a 3.5 Hz. Quando i fenomeni di risonanza sono inferiori a 5 Hz, lo spettro di input deve involuppare lo spettro target solo fino al 75% della frequenza di risonanza più bassa. Infine, l'accelerazione della tavola vibrante deve essere superiore al 90% di  $A_{RIG}$ .

Le storie temporali sono definite artificialmente secondo la procedura inclusa in Magliulo et al. 2012. Le storie temporali ottenute vengono quindi filtrate con un filtro passa-alto da 0.70 Hz per non superare le limitazioni di spostamento e velocità della tavola vibrante. I risultati sono mostrati in Figura 6. La procedura è stata eseguita per  $S_{DS} = 1.00 g$ ; gli accelerogrammi vengono quindi scalati al fine di ottenere diverse intensità di scuotimento.

È stato anche generato un'ulteriore coppia di storie temporali da utilizzare per i test unidirezionali (Figura 7). Questa coppia di accelerogrammi viene filtrata con un filtro passa-alto da 1.32 Hz per non superare i limiti di spostamento della strumentazione adottata. La corrispondente coppia di spettri è ancora compatibile con le prescrizioni del protocollo AC156, considerando la frequenza naturale prevista dei componenti testati.

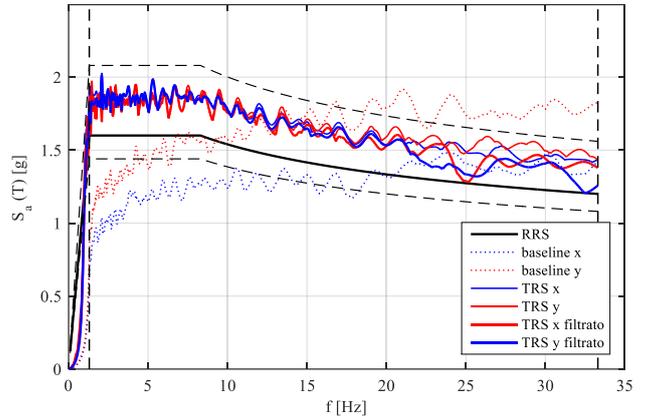
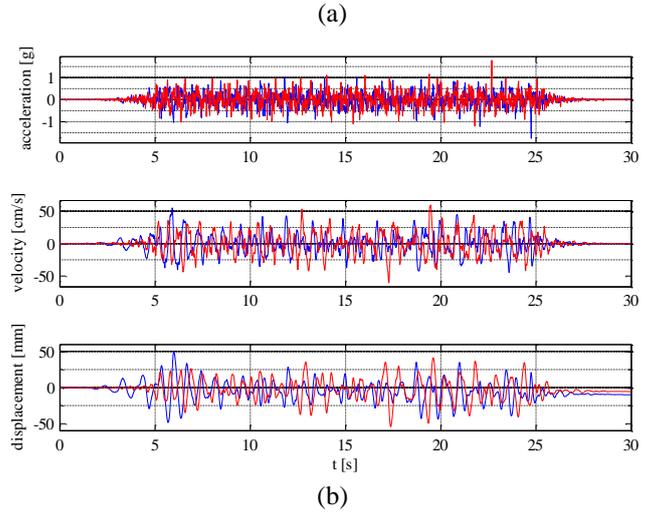


Figura 6: Storie temporali e spettri di input per  $S_{DS}$  pari a 1.00g: (a) storie temporali dell'accelerazione - direzione X (blu) e direzione Y (rosso) e (b) spettri degli accelerogrammi di input e intervallo di frequenze corrispondenti (linea tratteggiata verticale).

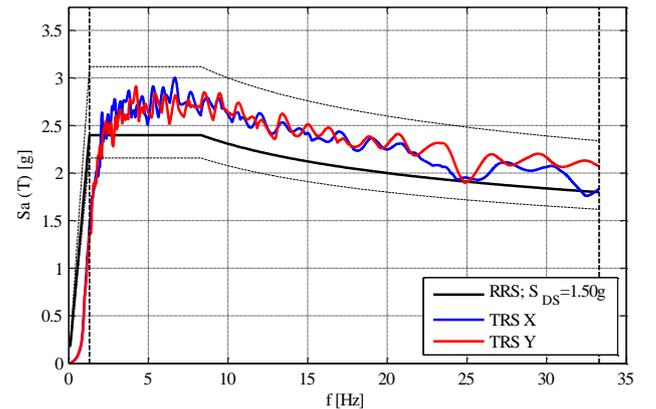


Figura 7: Spettro dell'accelerogramma di input, spettro target e relativi limiti (linea tratteggiata) per  $S_{DS}$  pari a 1.50 g.

I livelli di input di prova utilizzati vanno da  $S_{DS} = 0.05 g$  a  $S_{DS} = 1.30 g$  per generalizzare l'esecuzione del test, rappresentando una vasta gamma di intensità del terremoto. Gli scuotimenti caratterizzati da  $S_{DS}$  superiore a 0.9g vengono eseguiti unidirezionalmente in modo da garantire l'integrità del telaio di prova

La campagna di prove prevede 14 scuotimenti ad intensità crescente con incrementi di 0.10 g. Inoltre vengono eseguite delle prove random a bassa intensità dopo ogni test, al fine di monitorare le proprietà dinamiche del telaio di prova durante i diversi scuotimenti sismici.

In Tabella 1 è riportato il programma delle prove previste per le partizioni vetrate continue e miste (G&M).

Tabella 1: Protocollo di prova per le partizioni G&M.

ID PROVA	Tipologia	Tipo Provino	Input	PFA - SDS [g]	Direzione	CODICE	
1	1000	Random	G&M	RND	0.10	x	MNG G&M_RND_x_@010
2	2000	Random	G&M	RND	0.10	y	MNG G&M_RND_y_@010
3	101	Timehistory	G&M	AC1	0.05	x&y	MNG_G&M_AC1_x&y_@05
4	102	Timehistory	G&M	AC1	0.10	x&y	MNG_G&M_AC1_x&y_@010
5	103	Timehistory	G&M	AC1	0.20	x&y	MNG_G&M_AC1_x&y_@020
6	1004	Random	G&M	RND	0.20	x	MNG G&M_RND_x_@020
7	2004	Random	G&M	RND	0.20	y	MNG G&M_RND_y_@020
8	104	Timehistory	G&M	AC1	0.30	x&y	MNG_G&M_AC1_x&y_@030
9	1005	Random	G&M	RND	0.20	x	MNG G&M_RND_x_@020
10	2005	Random	G&M	RND	0.20	y	MNG G&M_RND_y_@020
11	105	Timehistory	G&M	AC1	0.40	x&y	MNG_G&M_AC1_x&y_@040
12	1006	Random	G&M	RND	0.20	x	MNG G&M_RND_x_@020
13	2006	Random	G&M	RND	0.20	y	MNG G&M_RND_y_@020
14	106	Timehistory	G&M	AC1	0.50	x&y	MNG_G&M_AC1_x&y_@050
15	1007	Random	G&M	RND	0.20	x	MNG G&M_RND_x_@020
16	2007	Random	G&M	RND	0.20	y	MNG G&M_RND_y_@020
17	107	Timehistory	G&M	AC1	0.60	x&y	MNG_G&M_AC1_x&y_@060
18	1008	Random	G&M	RND	0.20	x	MNG G&M_RND_x_@020
19	2008	Random	G&M	RND	0.20	y	MNG G&M_RND_y_@020
20	108	Timehistory	G&M	AC1	0.70	x&y	MNG_G&M_AC1_x&y_@070
21	1009	Random	G&M	RND	0.20	x	MNG G&M_RND_x_@020
22	2009	Random	G&M	RND	0.20	y	MNG G&M_RND_y_@020
23	109	Timehistory	G&M	AC1	0.80	x&y	MNG_G&M_AC1_x&y_@080
24	1010	Random	G&M	RND	0.20	x	MNG G&M_RND_x_@020
25	2010	Random	G&M	RND	0.20	y	MNG G&M_RND_y_@020
26	110	Timehistory	G&M	AC1	0.90	x&y	MNG_G&M_AC1_x&y_@090
27	1011	Random	G&M	RND	0.20	x	MNG G&M_RND_x_@020
28	2011	Random	G&M	RND	0.20	y	MNG G&M_RND_y_@020
29	111	Timehistory	G&M	AC1	1.00	x	MNG_G&M_AC1_x_@0100
30	211	Timehistory	G&M	AC1	1.00	y	MNG_G&M_AC1_y_@0100
31	1012	Random	G&M	RND	0.20	x	MNG G&M_RND_x_@020
32	2012	Random	G&M	RND	0.20	y	MNG G&M_RND_y_@020
33	112	Timehistory	G&M	AC2	1.10	x	MNG_G&M_AC2_x_@0110
34	212	Timehistory	G&M	AC2	1.10	y	MNG_G&M_AC2_y_@0110
35	1013	Random	G&M	RND	0.20	x	MNG G&M_RND_x_@020
36	2013	Random	G&M	RND	0.20	y	MNG G&M_RND_y_@020
37	113	Timehistory	G&M	AC2	1.20	x	MNG_G&M_AC2_x_@0120
38	213	Timehistory	G&M	AC2	1.20	y	MNG_G&M_AC2_y_@0120
39	1014	Random	G&M	RND	0.20	x	MNG G&M_RND_x_@020
40	2014	Random	G&M	RND	0.20	y	MNG G&M_RND_y_@020
41	114	Timehistory	G&M	AC2	1.30	x	MNG_G&M_AC2_x_@0130
42	214	Timehistory	G&M	AC2	1.30	y	MNG_G&M_AC2_y_@0130
43	214bis	Timehistory	G&M	AC2	1.30	y	MNG_G&M_AC2_y_@0130
44	1015	Random	G&M	RND	0.20	x	MNG G&M_RND_x_@020
45	2015	Random	G&M	RND	0.20	y	MNG G&M_RND_y_@020
46	2015bis	Random	G&M	RND	0.20	y	MNG G&M_RND_y_@020

### 2.3 Strumentazione di prova

Per monitorare la risposta del telaio di prova e dei pannelli sono adoperati accelerometri triassiali, strain gauges e laser per la misura degli spostamenti.

Un accelerometro è posizionato all'interno della tavola vibrante, per misurare le accelerazioni di input in entrambe le direzioni. Undici accelerometri sono disposti in modo da monitorare l'accelerazione in diverse posizioni del set up, come mostrato nella Figura 8.

Due di essi sono installati su due travi ortogonali; un altro è disposto sulla massa di calcestruzzo sopra il telaio di prova. Otto accelerometri sono installati sulle partizioni, al fine di indagare il loro comportamento fuori dal piano. In particolare, cinque di essi sono posizionati sulla parete disposta a sud: di questi, uno è posto al centro della partizione, mentre gli altri quattro sono installati lungo le direzioni

verticale e orizzontale, al fine di valutare la distribuzione dell'accelerazione della partizione lungo le due direzioni ortogonali. Infine sono installati altri tre accelerometri: il primo al centro della partizione disposta ad est, il secondo al centro della partizione a nord e il terzo al centro della partizione ad ovest.

Sono impiegati anche sensori laser di spostamento (Figura 9); in particolare, vengono utilizzati sei sensori laser a corto raggio (indicati con il prefisso "Weng" nella Figura 9) e tre sensori laser a lungo raggio (indicati con il prefisso "Luch" nella Figura 9). I sensori sono installati per valutare gli spostamenti assoluti e relativi dei pilastri in entrambe le direzioni orizzontali.

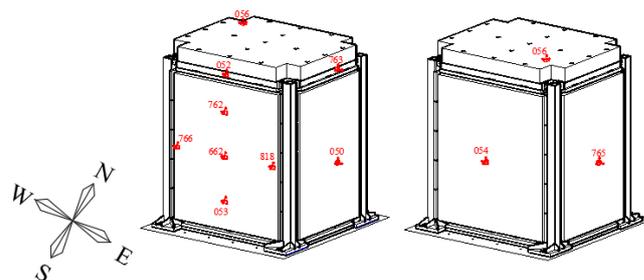


Figura 8: Posizione degli accelerometri sul telaio di prova e sulle partizioni.

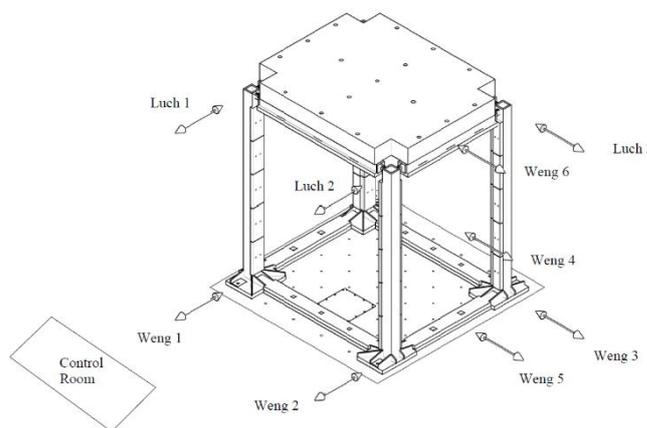


Figura 9: Disposizione della strumentazione laser.

### 2.4 Damage description

In questo studio è stata definita una scheda di danno in modo da correlare il danno visivo al raggiungimento di un determinato stato di danno. In particolare, vengono definiti tre stati di danno: Stato di Danno 1 (SD1), Stato di Danno 2 (SD2), Stato di Danno 3 (SD3). Le definizioni degli stati di danno sono strettamente correlate alla perdita che un dato stato di danno causerebbe, come riportato in Tabella 2. Le definizioni degli stati di danno e le loro conseguenze si basano sulla definizione data da Taghavi and Miranda 2003. In particolare, la correlazione tra ogni stato di danno e la perdita è data in termini di tre tipi di perdita (FEMA-461 2007): (a) perdita di vite umane

(Death), (b) perdita economica diretta dovuta alla riparazione e sostituzione dei componenti (Damage), e (c) perdita di servizio (Downtime). Il raggiungimento dell'SD1 implica la necessità di riparare in sito/riposizionare il componente danneggiato, ma non si ha perdita di funzionalità; SD2 significa che parte del componente è danneggiato e deve essere rimosso e sostituito, pertanto si ha perdita di servizio; SD3 implica che la salvaguardia della vita è minacciata e il componente deve essere totalmente sostituito.

Tabella 2: Scheda di danno per la correlazione del danno visivo allo stato di danno.

Damage Type	SD1	SD2	SD3
<b>Damage</b>	Necessità di riparazione o sostituzione per un numero di elementi maggiore del 10%	Necessità di riparazione o sostituzione per un numero di elementi maggiore del 30%	Necessità di riparazione o sostituzione per un numero di elementi maggiore del 50%
<b>Downtime</b>	-	Moderato (1-2 days)	Significativo ( $\geq 3$ days)
<b>Death</b>	-	Limitato	Significativo
<b>Component of the system</b>	<b>SD1</b>	<b>SD2</b>	<b>SD3</b>
<b>Pannelli in legno</b>	Lievi rotazioni fuori dal piano o nel piano del pannello	Rotazioni consistenti fuori dal piano del pannello, comparsa di fessure concentrate o di lieve entità, deformazioni plastiche residue ganci in acciaio (disassamento pannelli), rottura del 30% dei ganci	Ribaltamento dei pannelli, fessure diffuse o di grave entità, rottura del 50% dei ganci
<b>Pannelli in acciaio</b>	Lievi rotazioni fuori dal piano o nel piano del pannello	Rotazioni consistenti fuori dal piano del pannello, comparsa di fessure concentrate o di lieve entità, deformazioni plastiche residue ganci in acciaio (disassamento pannelli), rottura del 30% dei ganci	Ribaltamento dei pannelli, fessure diffuse o di grave entità, rottura del 50% dei ganci
<b>Pannelli in vetro</b>	Lievi rotazioni fuori dal piano o nel piano del pannello, fuoriuscita pannello dalle guide laterali, fuoriuscita o danneggiamento delle guarnizioni	Rotazioni consistenti fuori dal piano del pannello, comparsa di fessure concentrate o di lieve entità	Ribaltamento dei pannelli, fessure diffuse o di grave entità
<b>Sistema di collegamento pannelli in vetro Viti</b>	Distacco localizzato della banda adesiva Svitamento del 10% delle viti	Distacco diffuso della banda adesiva Svitamento del 30% delle viti	Spostamenti permanenti Svitamento del 50% delle viti
<b>Guide, montanti e traversi</b>	-	Deformazioni plastiche localizzate delle flange	Deformazioni plastiche diffuse, collasso per instabilità delle ali o della flangia
<b>Angolari di rivestimento laterali</b>	Distacco parziale	Deformazioni plastiche residue, distacco totale e ribaltamento	-
<b>Porta</b>	(Apertura SDO), danneggiamento della serratura	Bloccaggio	Ribaltamento

Il danno è osservato dopo ogni prova ispezionando i campioni testati. Il danno registrato in ogni componente è poi correlato ad uno dei tre stati di danno sopra definiti attraverso l'uso di una scheda di danno (Tabella 2). Il livello di danno richiesto per il raggiungimento di uno stato limite è definito per ogni tipologia di danno di ogni componente del sistema (pannelli, montanti, traversi, guide, viti e pressori). Ove possibile, il tipo di danno è definito quantitativamente. Lo stato di danno raggiunto dall'intero provino è il massimo stato registrato tra i differenti componenti. Infine, va sottolineato che alcune tipologie di danno possono essere osservate solo alla fine di ogni test, dopo aver smontato la partizione testata.

### 3 CONCLUSIONI

In questo lavoro è descritta la campagna sperimentale che ha condotto alla qualificazione sismica di partizioni mobili attraverso il protocollo di prova AC156, uno standard riconosciuto a livello internazionale per la qualificazione sismica degli elementi non strutturali su tavola vibrante.

Dopo una prima fase di preparazione del set-up, sono state eseguite le prove secondo il protocollo di prova. A valle di ciò, è stata condotta l'elaborazione dei dati acquisiti dagli strumenti, disposti per monitorare la risposta delle quattro partizioni qualificate. Tutti e quattro i sistemi di partizione sono stati sviluppati e brevettati con dettagli innovativi che migliorano la loro capacità sismica.

I dati della strumentazione hanno permesso di valutare le accelerazioni massime alla base della tavola e in testa al telaio di prova, gli spostamenti relativi massimi per ciascun test. Successivamente questi risultati sono stati correlati allo stato di danno raggiunto dalle partizioni.

Le partizioni qualificate, se analizzate fuori dal piano, sono elementi non strutturali sensibili alle accelerazioni. In particolare, considerando la massima accelerazione in testa, al centro e alla base di ogni componente, sono stati tracciati, per ogni test, i profili di accelerazione rispetto all'altezza della partizione.

### 4 RINGRAZIAMENTI

Il lavoro presentato è stato sviluppato nell'ambito di un progetto di ricerca finanziato dalla ditta MANGINI PARTITIONS, che ha partecipato attivamente allo sviluppo dei prodotti

innovativi, nelle persone di Massimo Mangini e Paolo Ponzio, ed ha fornito i prodotti stessi.

## RIFERIMENTI

- American Society of Civil Engineers. ASCE/SEI 7-10: minimum design loads for buildings and other structures. Reston, Virginia, US, 2010.
- Cosenza E, Di Sarno L, Maddaloni G, Magliulo G, Petrone C, Prota A. Shake table tests for the seismic fragility evaluation of hospital rooms. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2015; 44(1):23–40. DOI: 10.1002/eqe.2456.
- Dhakal RP. Damage to non-structural components and contents in the 2010 Darfield earthquake. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* 2010; 43(4):404–411.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA). Interim protocols for determining seismic performance characteristics of structural and nonstructural components through laboratory testing. Report No. FEMA 461. Washington DC, US, 2007.
- Filiatrault A. Seismic evaluation of modular office furniture system. *Earthquake Spectra* 1991; 7(4):529–541. DOI: 10.1193/1.1585641.
- Filiatrault A, Uang CM, Folz B, Christopoulos C, Gatto K. Reconnaissance report of Nisqually (Seattle-Olympia) February 28, 2001 earthquake. Report No.SSRP-2001/2002. Department of Structural Engineering, University of California San Diego. La Jolla, CA.,2001.
- ICC Evaluation Service, LLC (ICC-ES), Acceptance criteria for seismic certification by shake-table testing of non-structural components, October 2010.
- Ikuta E, Miyano M. *Study of Damage to the Human Body Caused by Earthquakes: Development of a Mannequin for Thoracic Compression Experiments and Cyber Mannequin Using the Finite Element Method*, (Spence R, So E, Scawthorn C Eds.), Human Casualties in Earthquakes. Springer: Netherlands, 2011. p 275–289.
- Jenkins C, Soroushian S, Rahmanishamsi E, Maragakis EM. Experimental fragility analysis of cold-formed steel-framed partition wall systems. *Thin-Walled Structures* 2016; 103:115–127. DOI: 10.1016/j.tws.2016.02.015.
- Lee TH, Kato M, Matsumiya T, Suita K, Nakashima M. Seismic performance evaluation of non-structural components: drywall partitions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2007; 36(3):367–382. DOI: 10.1002/eqe.638.
- Magliulo G, Pentangelo V, Maddaloni G, Capozzi V, Petrone C, Lopez P, Talamonti R, Manfredi G. Shake table tests for seismic assessment of suspended continuous ceilings. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2012; 10(6):1819–1832. DOI: 10.1007/s10518-012-9383-6.
- Magliulo G, Petrone C, Capozzi V, Maddaloni G, Lopez P, Manfredi G. Seismic performance evaluation of plasterboard partitions via shake table tests. *Bulletin of Earthquake Engineering* 2014; 12(4):1657–1677. DOI: 10.1007/s10518-013-9567-8.
- Petrone C, Magliulo G, Manfredi G. Shake table tests for the seismic assessment of hollow brick internal partitions. *Engineering Structures* 2014; 72(0):203–214. DOI:10.1016/j.engstruct.2014.04.044.
- Petrone C, Magliulo G, Manfredi G. Shake table tests on standard and innovative temporary partition walls. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2017; 46:1599–1624.
- Retamales R, Davies R, Mosqueda G, Filiatrault A. Experimental seismic fragility of cold-formed steel framed gypsum partition walls. *Journal of Structural Engineering* 2013; 139(8):1285–1293. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000657.
- Soroushian S, Maragakis EM, Ryan KL, Sato E, Sasaki T, Okazaki T, Mosqueda G. Seismic simulation of an integrated ceiling-partition wall-piping system at E-defense. II: evaluation of non-structural damage and fragilities. *Journal of Structural Engineering* 2016; 142(204015131):. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001385.
- Taghavi S, Miranda E. Response assessment of non-structural building elements, PEER report 2003/05. College of Engineering, University of California Berkeley, USA, 2003.
- Villaverde R. Seismic design of secondary structures: state of the art. *Journal of Structural Engineering-Asce*1997;123(8):1011–1019.DOI:10.1061/(Asce)0733-9445(1997)123:8(1011).
- Wang DZ, Dai JW. Dynamic response of ceiling system with light steel furring and gypsum board under severe earthquake. *Applied Mechanics and Materials* 2012; 166–169(1):2221–2225.