

Laboratori Eucentre

Prove dinamiche su tavola vibrante di elementi non strutturali

Davide Bolognini¹, Valeria Fort¹, Paolo Dubini¹, Daniele Perrone² Filippo Dacarro³, Simone Peloso⁴ ■

Uno dei più importanti sviluppi nel campo dell'ingegneria sismica riguarda l'applicazione del concetto di prestazionalità, secondo il quale i sistemi strutturali devono soddisfare i requisiti necessari per garantire il raggiungimento di prefissati stati limite a cui sono associati opportuni spettri di progetto definiti in normativa.

La comunità scientifica ha tuttavia maturato nel corso del tempo una crescente consapevolezza riguardo al fatto che, pur essendo fondamentale, il controllo della sola risposta strutturale non sia in realtà sufficiente né a garantire totalmente le condizioni di sicurezza durante un evento sismico, né a contenere efficacemente le perdite, dato che il vasto numero di elementi non riconducibili a strutture portanti presenti in un edificio (e.g. tramezze, tamponature, componenti architettonici e d'arredo, macchinari, attrezzature meccaniche o elettriche), anch'essi soggetti al sisma, costituiscono fonti di situazioni incontrollate e di ulteriori perdite umane ed economiche, potenzialmente ingenti.

Alcune caratteristiche peculiari rendono gli elementi non strutturali naturalmente predisposti verso un incremento del rischio e delle perdite. Il fatto che essi siano spesso caratterizzati da una elevata vulnerabilità è testimoniato dai numerosi esempi di danni, riscontrati perfino in caso di danneggiamento strutturale ridotto o nullo, che hanno causato interruzioni di attività all'interno degli edifici anche a bassa intensità sismica (Creager et al., 2001; Filiatrault et al., 2001; Badillo-Almaraz et al., 2006; Chock et al., 2006; Augenti & Parisi, 2010; Achour et al., 2011; Berryman et al., 2011; Braga et al., 2011; Miranda et al., 2012; Perrone et al., 2018, solo per citarne alcuni). Il loro valore economico, e quindi quello delle relative perdite, in genere supera ampiamente quello delle strutture; tale sbilanciamento è particolarmente accentuato nel caso di edifici sensibili, come gli ospedali, e impianti produttivi (Ayers & Sun, 1973; Rihal, 1992; Miranda & Taghavi, 2003). In aggiunta, il livello di rischio indotto sugli occupanti, legato a rotture o crolli improvvisi (e.g. tamponamenti, elementi d'arredo, componenti architettonici), è da tenere in grande considerazione e risulta essere particolarmente critico nel caso di elementi di dimensioni e massa rilevanti (scaffalature, magazzini automatici) o da cui dipenda la sicurezza dell'ambiente circostante (impianti antincendio, linee di distribuzione di gas o liquidi infiammabili).

Rispetto alla conoscenza e all'esperienza, ormai più che cinquantennale, maturata nell'ambito della protezione sismica delle strutture, il percorso intrapreso dalla comunità scientifica nell'ambito della ricerca sugli elementi non strutturali non può che considerarsi sostanzialmente in fase iniziale. Sembra comunque già sufficientemente chiaro come e quanto il danneggiamento o il collasso di elementi non classificabili come strutture possa significativamente ridurre le prestazioni dell'intero sistema, soprattutto nel caso di edifici sensibili o di pubblica utilità. Per questo motivo recenti lavori auspicano che gli elementi non strutturali vengano considerati "parte integrante della progettazione ed analisi sismica di un edificio" (Calvi et al., 2015).

Tralasciando ulteriori informazioni di carattere generale, in questa rubrica riteniamo interessante indirizzare l'attenzione sul fronte della caratterizzazione sismica sperimentale e, in tale ambito, enfatizzare il ruolo e l'importanza dei protocolli di prova. La conoscenza del reale comportamento sismico degli elementi non strutturali è uno dei primi passi che la ricerca finalizzata allo sviluppo di metodi progettuali dovrebbe intraprendere. Da un punto di vista strettamente pratico gli approcci a cui è ipotizzabile ricorrere per sviluppare una procedura di qualifica sismica sono:

- analisi numeriche;
- prove dinamiche su tavola vibrante;
- confronti diretti con elementi non strutturali simili che abbiano subito e superato un evento sismico.

¹ Fondazione Eucentre - Dipartimento Experimental Techniques, Pavia, Italia

² Scuola Universitaria Superiore IUSS Pavia

³ Fondazione Eucentre - Direttore Dipartimento Experimental Techniques, Delegato responsabile dei Laboratori

⁴ Fondazione Eucentre - Direttore Dipartimento Industrial Products

In tale contesto è implicito che siano noti il livello di sollecitazione (per esempio correlato all'accelerazione attesa, alle caratteristiche di sito e all'amplificazione strutturale) e le prestazioni minime attese. Nel caso di prove sperimentali, inoltre, un opportuno protocollo deve definire l'input sismico di riferimento.

La reale efficacia di tale protocollo è uno degli aspetti più delicati dell'approccio e proprio per questo motivo è importante sottolineare che le normative internazionali spesso basano le loro prescrizioni su modelli empirici e su osservazioni dirette legate ai terremoti recenti, piuttosto che su approcci analitici discendenti dall'evidenza sperimentale. Questa è un'ulteriore giustificazione alla sopracitata necessità di colmare la lacuna di informazioni sperimentali in grado di caratterizzare la risposta degli elementi non strutturali (Yao et al., 2004; Chai & Lin, 2012; Tian et al., 2014; Cosenza et al., 2015; Chen et al., 2016; Pantoli et al., 2016; Wang et al., 2017).

A livello Europeo, linee guida che indirizzino la progettazione e definiscano requisiti minimi e prestazioni attese sono presenti solo per poche tipologie di elementi (e.g. EN 16681:2016 per le scaffalature, EN 81-77:2014 per gli ascensori), ma a livello generale non esistono indicazioni e norme effettivamente cogenti.

In Italia le recenti Norme Tecniche per le Costruzioni dedicano due paragrafi per specificare le responsabilità delle figure professionali coinvolte e definire alcuni criteri progettuali di base degli impianti.

In definitiva, da un lato la mancanza di norme specifiche, dall'altro la necessità di protocolli realmente efficaci per la valutazione delle prestazioni sismiche degli elementi, hanno fatto sì che le problematiche legate alla qualifica sismica finalizzate ad una sorta di "riconoscimento", sostanzialmente, non siano state finora prese in considerazione dai produttori.

Alcune grandi aziende operanti a livello internazionale, che mostrandosi sensibili al problema validano i loro prodotti attraverso prove sperimentali, stanno contribuendo ad auspicare una situazione in cui, grazie alla certificazione sismica ottenuta attraverso una procedura affidabile da parte di un ente riconosciuto, si garantisca agli utenti un prodotto sismicamente efficiente e ai produttori un vantaggio rispetto alla concorrenza. Di fatto, poi, dato il sopracitato contesto, la scelta abbastanza forzata è di rifarsi principalmente a protocolli di prova e a standard statunitensi (e.g. Bachman, 2008). Va inoltre aggiunto che in alcuni casi i produttori, pur rifacendosi a protocolli ritenuti affidabili, spesso puntano a validazioni estremamente generali (e.g. adozione di spettri molto conservativi o estremamente diversificati al fine di coprire la più ampia porzione di mercato), rendendo estremamente complesse ed onerose le fasi sperimentali, ma anche difficoltoso il superamento dei controlli, tanto da desistere a causa dei costi e della mancanza di riscontri. In ogni caso l'imposizione di una certificazione sismica ottenuta attraverso un codice di qualifica opportuno contribuirebbe sicuramente a migliorare sia la qualità dei prodotti, sia il livello di competitività dei produttori.

In questo contesto Eucentre ha avviato da alcuni anni un processo di sviluppo contraddistinto da alcune tappe fondamentali, alcune delle quali sono: (i) la notifica e l'accreditamento dei laboratori; (ii) la partecipazione alle attività dell'associazione internazionale SPONSE (Seismic Performance Of Non-Structural Elements, <http://www.sponse.eu>); (iii) la creazione di collegamenti con i produttori di elementi non strutturali ed enti certificatori internazionali; (iv) la realizzazione di una nuova tavola vibrante multi-assiale. Del ruolo e degli obiettivi dell'associazione SPONSE si è già accennato nel n. 2/2015; tale associazione ha lo scopo di contribuire al miglioramento della resilienza delle comunità ai terremoti promuovendo la ricerca, la formazione e la divulgazione su argomenti relativi al comportamento sismico di elementi non strutturali, facilitando la collaborazione in questo campo tra industria, mondo accademico e professionisti. È interessante notare come gli obiettivi di SPONSE possano essere anche visti come la declinazione al mondo degli elementi non strutturali di quelli che sono i compiti statutari di Eucentre, che già da qualche anno sviluppa metodi analitici e sperimentali al fine di migliorare le conoscenze sulle prestazioni sismiche, e sull'analisi e la progettazione di elementi non strutturali.

Che il fronte dello sviluppo di attrezzature e facilities sia in costante evoluzione è già stato menzionato nelle precedenti rubriche. Per quanto riguarda la seconda tavola vibrante del laboratorio 6D-Lab, infatti, il passaggio da 4 a 6 gradi di libertà, previsto nei primi mesi del 2019, permetterà di effettuare anche test triassiali.

Un ulteriore importante sviluppo successivo, pianificato relativamente a breve, è la realizzazione di una struttura di prova per la simulazione sismica di effetti interpiano (Figura 1). Si tratta di un'ulteriore tavola vibrante posizionata al di sopra di quella esistente, sostenuta da apposite bielle a snodi sferici e movimentata da quattro attuatori caratterizzati da una elevata capacità di spostamento. Questa nuova configurazione permetterà di simulare la risposta relativa di qualsiasi coppia contigua di piani di edifici a qualunque altezza ed è particolarmente adatta nel caso di test su elementi di tipo drift-sensitive.

Tornando al fronte dell'attività sperimentale vera e propria, riportiamo un breve riassunto di una delle prove più recenti realizzate in tema di elementi non strutturali riguardante, nello specifico, la caratterizzazione della risposta sismica di condensatori e unità di raffreddamento per server e attrezzature elettriche mediante test dinamici su tavola vibrante multiassiale (Figura 2). Le linee guida adottate come riferimento per ogni singola fase dei test, dal posizionamento dei provini alle verifiche conclusive, sono state le AC-156:2010 ("Acceptance Criteria for Seismic Certification by Shake-Table Testing of Nonstructural Components") dell'International Code Council. Come da procedura, i provini sono stati vincolati al piano superiore della tavola per poi essere strumentati mediante accelerometri triassiali e trasduttori di spostamento sia meccanici (Figura 3a), sia ottici.

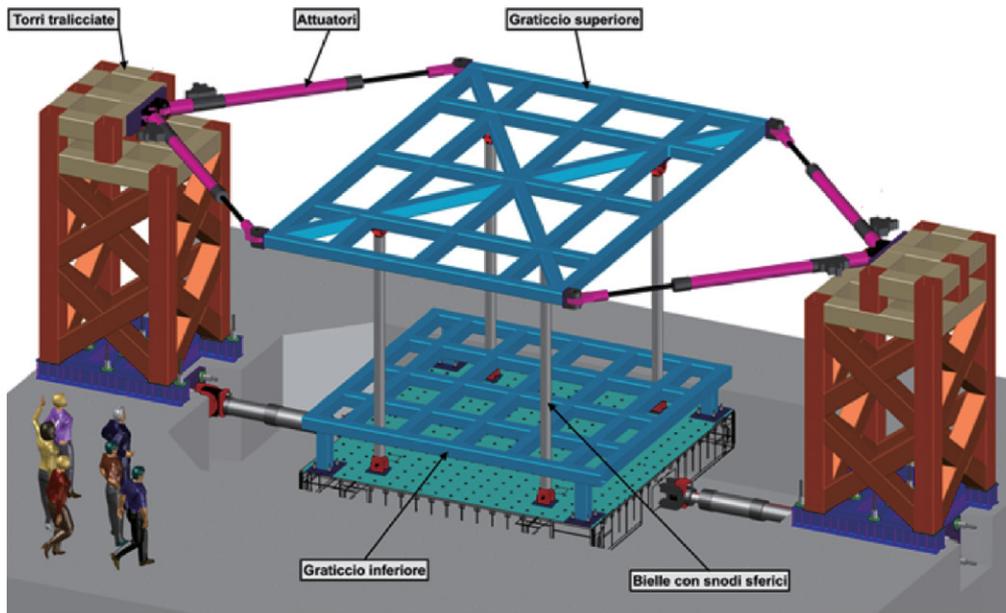
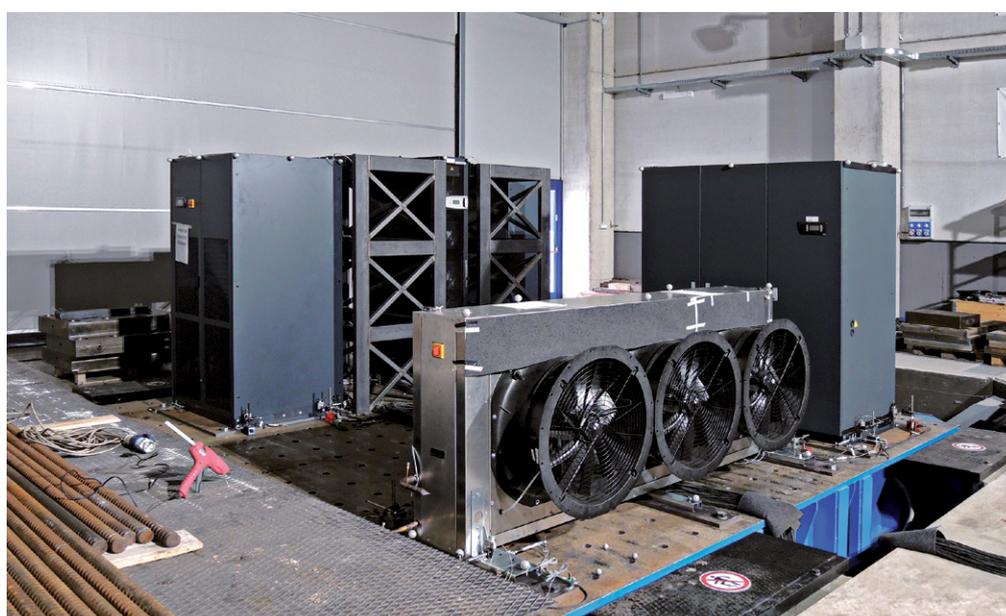


Figura 1
 Schema semplificato della configurazione per la simulazione sismica di effetti interpiano, dopo il passaggio della tavola vibrante esistente da 4 a 6 gradi di libertà.



Figura 2
 Viste d'insieme dei provini posizionati sulla tavola vibrante multiassiale.



In particolare, l'acquisizione ottica, basata sulla triangolazione di telecamere a raggi infrarossi su un sistema di marker retro-riflettenti (Figura 3b), ha consentito di rilevare le tre componenti traslazionali nello spazio della sommità dei singoli provini (o di un qualsiasi punto identificato tramite un marker) rispetto ad un punto di riferimento, per esempio la tavola vibrante o la base degli stessi provini.

L'input sismico è stato definito sulla base di un protocollo di prova molto esteso che ha fatto riferimento sia alle sopraccitate indicazioni AC-156, sia alle BS ISO 13033:2013 ("Bases for design of structures – Loads, forces and other actions – Seismic actions on nonstructural components for building applications"). Si tratta, in sostanza, di due serie di spettri a differente intensità sismica le cui componenti orizzontali e verticali sono rappresentate nei grafici di Figura 4. Per indagare le due direzioni nel piano

Figura 3
Strumentazione dei provini:
dettagli di alcuni
(a) trasduttori di spostamento
e (b) marker retro-riflettenti.

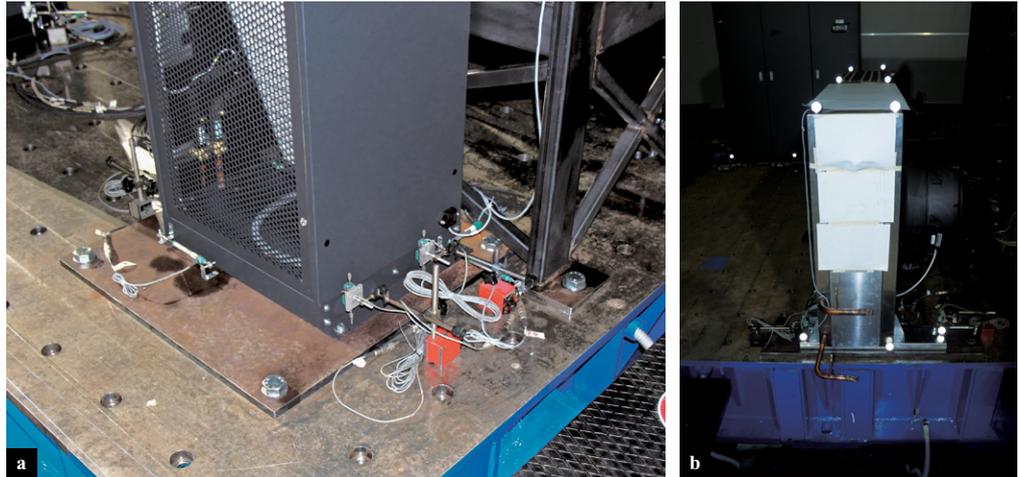
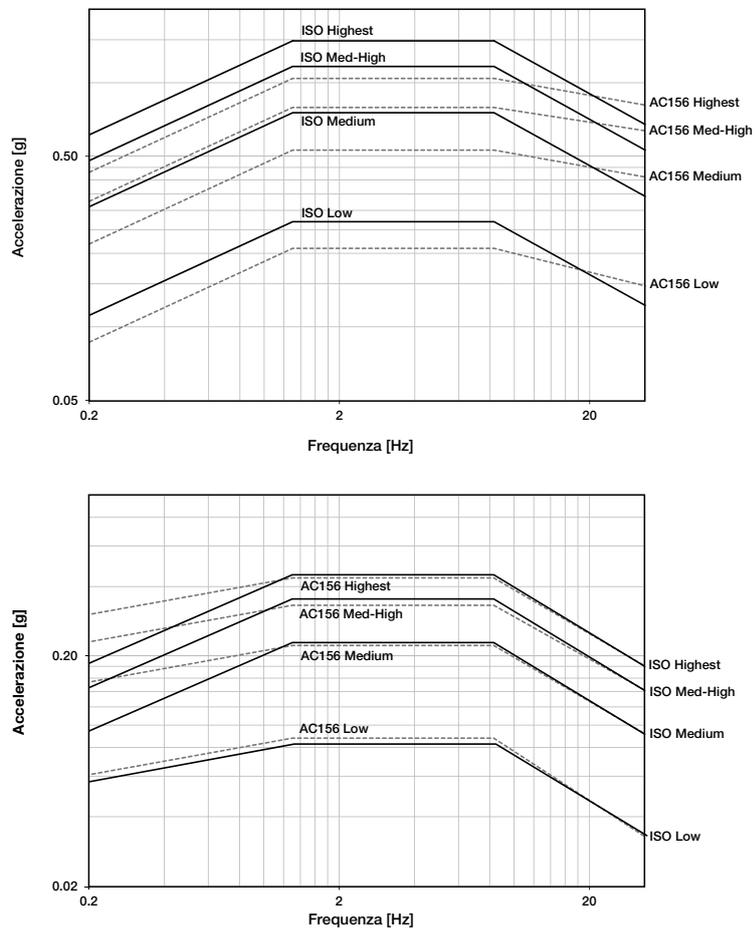


Figura 4
Componenti orizzontali (sopra)
e verticali (sotto) degli spettri
in accelerazione a diversa
intensità sismica definiti sulla
base delle indicazioni AC-156
e ISO-13033.



sono state effettuate due serie di prove biassiali a componenti orizzontale e verticale concomitanti, previa rotazione dei provini di 90° fra un test ed il successivo. Come anticipato, all'inizio del prossimo anno sarà possibile effettuare direttamente test triassiali. Le verifiche finali, oltre a dimostrare l'integrità fisica dei provini, sono caratterizzate da una serie di requisiti di maggior dettaglio in funzione di due differenti livelli del fattore di importanza.

Gli ulteriori risultati prodotti sono stati sostanzialmente: confronti numerici fra gli spettri di riferimento e i segnali di feedback dell'input sismico applicato alla base (Figura 5), informazioni sulle frequenze principali pre- e post-test ricavate da apposite prove addizionali contraddistinte da segnale random ad ampiezza costante e da impulsi, valori istantanei di accelerazioni e spostamenti in vari punti e quote dei provini.

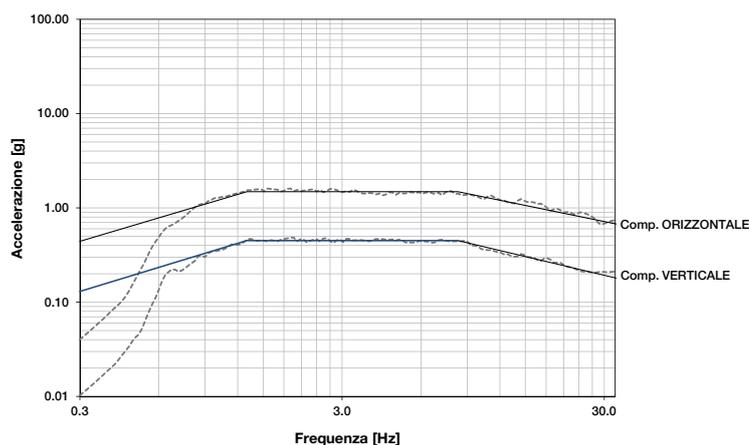


Figura 5
Confronto fra le componenti orizzontale e verticale degli spettri di riferimento in accelerazione e i corrispondenti segnali di feedback relativi al caso ISO-13033-Highest.

Bibliografia

- AC 156, International Code Council, Evaluation Service (2010), "Acceptance criteria for seismic certification by shake-table testing of nonstructural components".
- ATC FEMA 461:2007 "Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components" www.ATCCouncil.org
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018, "Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni". Gazzetta Ufficiale n. 42 del 20 Febbraio 2018.
- ISO 13033:2013 "Bases for design of structures - Loads, forces and other actions - Seismic actions on nonstructural components for building applications".
- Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2018), "Decreto 17 gennaio 2018: Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni", G.U. n. 42 20/02/2018.
- Achour N., Miyajima M., Kitaura M., Price A. (2011) - Earthquake Induced Structural and Non-structural Damage in Hospitals, Earthquake Spectra, Vol. 27(3), pp. 617-634.
- Augenti N., Parisi F. (2010) - Learning from Construction Failures due to the 2009 L'Aquila, Italy, Earthquake, Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, November/December 2010.
- Ayers, J.M., Sun T.Y. (1973). "Nonstructural damages," San Fernando, California, earthquake of February 9, 1971," U.S. Dept. of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Admin.
- Bachman R.E. (2008) - Building Code requirements for maintaining functionality of nonstructural components in the United States, 14th WCEE, October 12-17 2008, Beijing, China.
- Badillo-Almaraz H., Whittker A.S., Reinhorn A.M., Cimellaro G.P. (2006) - Seismic fragility of suspended ceiling systems, Report MCE-ER-06-0001.
- Berryman K., Gerstenberger M., Massey C., Fursman, L. (2011) - The Canterbury Earthquake Sequence of 2010-2011, New Zealand: a review of seismology, damage observations and consequences.
- Braga F., Manfredi V., Masi A., Salvatori A., Vona M. (2011) - Performance of non structural elements in RC buildings during the L'Aquila, 2009 earthquake, Bull Earthquake Eng (2011) 9:307-324 DOI 10.1007/s10518-010-9205-7.
- Calvi P., Moratti M., Filiatrault A. (2015) - Studio della risposta di elementi non strutturali di edifici scolastici soggetti ad eventi sismici, Progettazione Sismica n.3-2015.
- Chai J.F., Lin F.R. (2011) - Seismic retrofit and shaking table test of medical equipment in a hospital, Proceedings of the Ninth Pacific Conference on Earthquake Engineering Building an Earthquake-Resilient Society 14-16 April, 2011, Auckland, New Zealand.
- Chen M.C., Pantoli E., Wang X., Astroza R., Ebrahimian H., Hutchinson T.C., Conte J.P., Restrepo J.I., Marin C., Walsh K.D., Bachman R.E., Hoehler M.S., Englekirk R., Faghihi M. (2016) - Full-Scale Structural and Nonstructural Building System Performance during Earthquakes: Part I – Specimen Description, Test Protocol, and Structural Response, Earthquake Spectra, V.32, N.2, pages 737-770, May 2016; © 2016, Earthquake Engineering Research Institute.

- Chock G., Roberston I., Nicholson P., Brandles H., Medley E., Okubo P., Hirshorn B., Sumada J., Kindred T., Iinuma G., Lau E., Sarwar A., Del Pino J., Holmes W. (2006) - Compilation of Observations of the October 15, 2006 Kiholo Bay (Mw 6.7) and Mahukona (Mw 6.0) Earthquakes, Hawaii.
- Cosenza E., Di Sarno L., Maddaloni G., Magliulo G., Petrone C., Prota A. (2015) - Shake table tests for the seismic fragility evaluation of hospital rooms, *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 2015; 44:23-40.
- Creager K., Crosson R., Pratt T., Weaver C., Kramer S., MacRae G., Lehman D., Eberhard M., Lowes L., Stanton J., Ballantyne D., May P., Chang S. (2001) - The Nisqually Earthquake of 28 February 2001 Preliminary Reconnaissance Report, Nisqually Earthquake Clearinghouse Group, University of Washington Seattle, WA, March 2001.
- Filiatrault A., Perrone D., Merino R., Calvi, G.M. (2018) - Performance-Based Seismic Design of Non-Structural Building Elements, *Journal of Earthquake Engineering*, <https://doi.org/10.1080/13632469.2018.1512910>.
- Filiatrault A., Sullivan T. (2014) - Performance-based Seismic Design of Nonstructural Building Components: The Next Frontier of Earthquake Engineering, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Special Issue on the State-of-the-art and Future Challenges of Earthquake Engineering, 13(1) Supplement, 17-46.
- Filiatrault A., Uang C-M., Folz B., Christopoulos C., Gatto K. (2001) - Reconnaissance Report of the February 28, 2001 Nisqually (Seattle-Olympia) Earthquake. Structural Systems Research Project Report No. SSRP-2000/15, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, La Jolla, CA, 62 p.
- Miranda E., Mosqueda G., Retamales G., Pekcan G. (2012) - Performance of nonstructural components during the 27 February 2010 Chile Earthquake, *Earthquake Spectra* 28(S1): S453-S471.
- Miranda E., Taghavi S. (2003) - Estimation of Seismic Demands on Acceleration-Sensitive Nonstructural Components in Critical Facilities. Proceedings of the Seminar on Seismic Design, Performance, and Retrofit of Nonstructural Components in Critical Facilities, ATC 29-2, Newport Beach, CA, 347- 360.
- Pantoli E., Chen M.C., Wang X., Astroza R., Ebrahimian H., Hutchinson T.C., Conte J.P., Restrepo J.I., Marin C., Walsh K. D., Bachman R.E., Hoeler M. S., Englekirk R., Faghihi M. (2016) - Full-Scale Structural and Nonstructural Building System Performance during Earthquakes: Part II - NCS Damage States, *Earthquake Spectra*, V.32, N.2, pages 771-794, May 2016; ©2016, Earthquake Engineering Research Institute.
- Perrone D., Calvi P.M., Nascimbene R., Fischer E.C., Magliulo G. (2018) - Seismic performance of non-structural elements during the 2016 Central Italy Earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0361-5>
- Rihal, S. S. (1992). "Performance and behavior of non-structural building components during the Whittier Narrows, California (1987) and Loma Prieta, California (1989) earthquakes: selected case studies," Report No. ATC-29, Proc. Seminar and Workshop on Seismic Design and Performance of Equipment and Nonstructural Elements in Buildings and Industrial Structures, Applied Technology Council, Redwood City, California, pp. 119-143.
- Taghavi S., Miranda E. (2004) - Estimation of seismic acceleration demands in building components, Proc. of the 13th WCEE, Vancouver B.C., Canada, August 1-6, 2004, Paper No. 3199.
- Tian Y., Filiatrault A., Mosqueda G. (2014) - Experimental Seismic Fragility of Pressurized Fire Suppression Sprinkler Piping Joints, *Earthquake Spectra* 30(4):1733-1748.
- Yao G.C., Tseng C.C., Shen T.H. (2004) - Elevator cw derailment research in Taiwan, Proc. of the 13th WCEE, Vancouver B.C., Canada, August 1-6, 2004, Paper No. 3204.
- Wang X., Hutchinson T.C., Astroza R., Conte J.P., Restrepo J.I., Hoehler M.S., Ribeiro W. (2017) - Shake table testing of an elevator system in a full-scale five-story building, *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 2017; 46:391-407.