

Comportamento sismico degli ascensori

Seismic Behavior of the Elevators

In context of growing urbanization, characterized by an increasingly older population, the theme of accessibility of spaces is taking a central role in the design, also in relation to an increasing cultural sensitivity in the matter of breaking down architectural barriers; in this context the lift plays a crucial role. The numbers show a sector in strong growth: in the Eurasian market is recorded a global volume of 16.5 million installations with an increasing trend of about 1 million per year.

The elevators are also part of the "smart" systems, subject to a strong technological and digitization innovation, and are undoubtedly among the most important mechanical systems in building structures, however they are still too sensitive to damage caused by earthquakes. Suffice to say that, in Italy, 55% of the installations are over 30 years old and therefore are not designed according to any seismic criteria and even the most modern installations are not always equipped with adequate technical solutions. In addition, in buildings such as hospitals, the lift must guarantee not only its structural integrity but also full operation right after the event.

This work aims to highlight the most important components of an elevator and which elements are most vulnerable to an earthquake. In this regard, a review of damage to elevators found in past earthquakes will be proposed. The evolution of the regulatory framework in the Italian and European context will also be presented. The recent entry into force of the Technical Standards for Construction 2018 defines precise profiles of responsibility, in case of a seismic event, for designers of non-structural elements and systems and, in the European panorama, the UNI EN 81-77: 2019 standard provides some useful design tool. The study of the seismic performance of non-structural elements, such as elevators, is certainly one of the new and most fascinating frontiers of seismic engineering. The EUCENTRE Foundation with its Laboratories provides support to companies, institutions and companies in research and experimentation in this field.

Pasquale Pipino Laureato in Ingegneria presso l'Università di Pavia (2018), è collaboratore di ricerca presso la Fondazione EUCENTRE. Coinvolto in vari progetti, si occupa di riduzione dati e coadiuva le operazioni di gestione delle emergenze post-sisma.

Paolo Dubini Ricercatore presso il Dipartimento Tecniche Sperimentali della Fondazione EUCENTRE. Ha conseguito la laurea in Ingegneria (2005) e il Dottorato (2010) presso il Politecnico di Milano. Si occupa di metodologie, attrezzature e prove sperimentali nel campo dell'Ingegneria Sismica.

Simone Peloso Dirige il Dipartimento Prodotti Industriali della Fondazione EUCENTRE dove, da anni, si occupa di prove sperimentali. Dopo un periodo come visiting scholar presso l'University of Illinois (UIUC, 2003), ha conseguito il Dottorato in Ingegneria Sismica (2006) presso l'Università di Pavia.

Filippo Dacarro Laureato in Ingegneria presso l'Università di Pavia (1998), dirige il Dipartimento Tecniche Sperimentali di EUCENTRE. Si occupa di sperimentazione e monitoraggio strutturale. È stato collaboratore nella progettazione dei laboratori EUCENTRE e responsabile dell'allestimento tecnologico.

Introduzione

Fra le conseguenze di un evento sismico, oltre ai danni agli elementi strutturali, che possono compromettere la sicurezza e la stabilità di un edificio, una grande attenzione va rivolta al comportamento degli elementi non strutturali, il cui danneggiamento può portare alla perdita parziale o completa di funzionalità in strutture quali ospedali, aeroporti, laboratori, edifici industriali e commerciali. Gli ascensori, in tal senso, rivestono un ruolo di particolare importanza in una struttura perché consentono lo spostamento più agevole di persone e oggetti in edifici, ma soprattutto, insieme ai vari dispositivi di elevazione (come piattaforme elevatrici e servoscala), rappresentano uno strumento necessario per il superamento delle barriere architettoniche, rendendo gli spazi più accessibili alle persone con disabilità, o più in generale, con difficoltà motorie. Le Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 prevedono che le strutture di Classe d'uso III e IV vengano progettate in modo che, a seguito di un terremoto, gli elementi strutturali e non strutturali e le apparecchiature rilevanti per il funzionamento non subiscano danni ed interruzioni d'uso significativi, secondo il livello prestazionale individuato dallo Stato Limite di Operatività (SLO). È indubbio che l'accessibilità verticale garantita dagli ascensori rappresenti pertanto un requisito fondamentale per la funzionalità delle strutture con rilevanza strategica, e in particolare per le strutture ospedaliere (case di cura, ospedali, ambulatori), che in una situazione di emergenza post sismica, ancor più che in condizioni ordinarie, devono assicurare piena efficienza per la gestione immediata dei soccorsi.

Stato dell'arte. Esempi di danni a seguito di terremoti

Diversi studi hanno dimostrato la vulnerabilità degli ascensori a seguito di eventi sismici, soprattutto nel caso di impianti non recenti, realizzati prima che venissero introdotte delle specifiche norme di progettazione antisismica. Tra le varie tipologie di danno osservate durante alcuni terremoti degli ultimi decenni ci sono (Suarez *et al.*, 2000):

- Danni agli ancoraggi dei binari;
- Flessione dei binari;
- Deragliamento del contrappeso;
- Deragliamento della cabina;
- Impatto del contrappeso sulla cabina;
- Pannelli di controllo inclinati o spostati;
- Macchine di trazione staccate dai supporti;
- Spostamenti del generatore lungo il piano della sala macchina;
- Funi danneggiate per contatto con sporgenze nel vano;
- Funi di sospensione fuoriuscite dalle pulegge.

In particolare, il danno più frequentemente riscontrato è il deragliamento del contrappeso, che è l'elemento con la maggiore massa concentrata, e che pertanto risente di più delle accelerazioni sismiche. Il fenomeno è stato osservato soprattutto quando il contrappeso si trovava in cima all'edificio (Swerrie, 1991, Ding *et al.*, 1990). In Fig. 01 sono rappresentate alcune immagini di danni. Wada e Kitamura (1995) hanno osservato che, nelle città di Kobe, a seguito del terremoto del 1995, circa il 28% degli ascensori progettati secondo le nuove norme antisismiche del 1983 ha comunque subito danni, e la percentuale è intorno al 50% per gli impianti più vecchi, per un totale di oltre 5000 ascensori danneggiati.

In generale, non sono stati registrati molti casi di persone ferite a causa del danneggiamento degli ascensori, ma se la sicurezza delle persone è senza dubbio prioritaria, molto rilevanti sono anche le conseguenze economiche e sociali legate all'interruzione d'uso degli edifici, e in particolare degli ospedali, per ascensori non operativi. A tal proposito, Yavari *et al.* (2010) hanno condotto uno

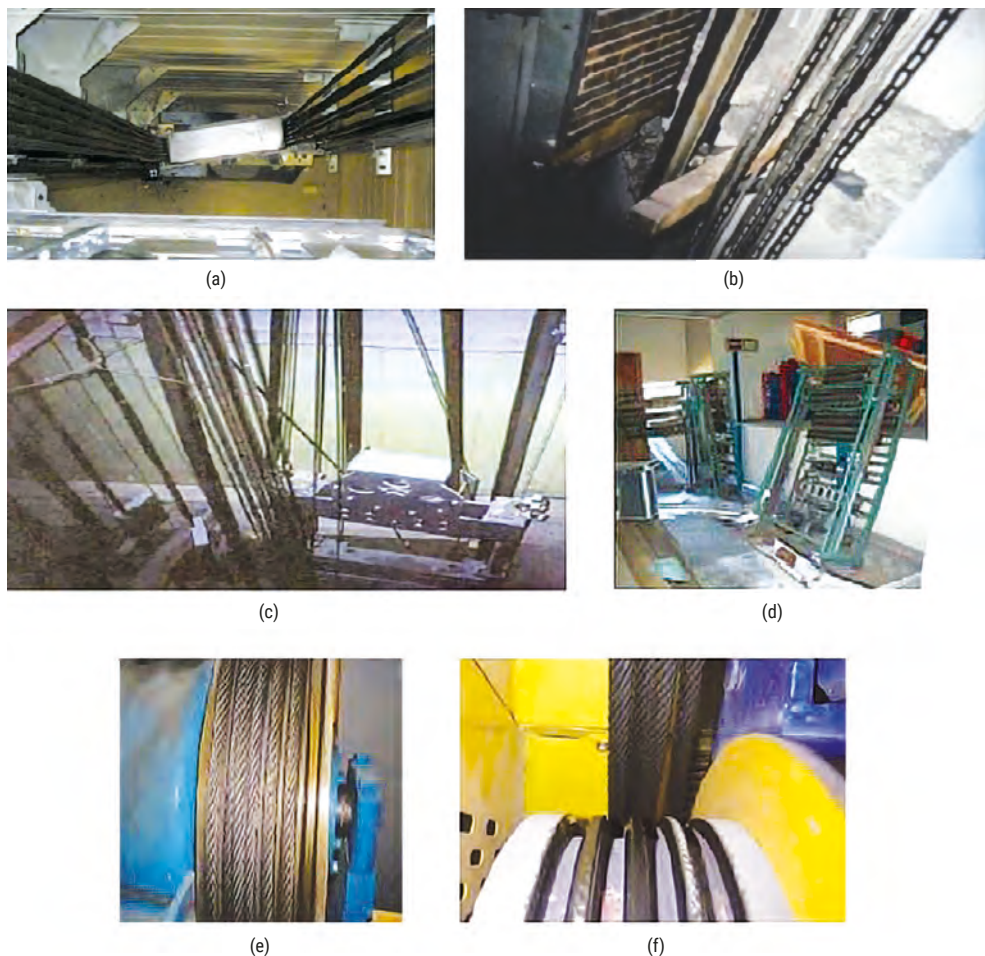


Fig.01 Esempi di danni: (a) deragliamenti del contrappeso [Tattoli, 2017]; (b) fuoriuscita dei blocchi di riempimento dal telaio [Tattoli, 2017]; (c) funi impigliate nelle parti fisse del vano [Tattoli, 2017]; (d) danni agli ancoraggi dei pannelli di controllo [Miranda *et al.*, 2012]; (e) accavallamento delle funi [Du, 2008]; (f) scarrucolamento delle funi dalle pulegge [Du, 2008].

studio sulle classi di funzionalità degli ospedali. Miranda *et al.* (2010) hanno osservato che l'83% degli ospedali danneggiati nel terremoto del Cile del 2010 ha subito una perdita parziale o completa di funzionalità, esclusivamente dovuta a danni non strutturali, e hanno riscontrato una percentuale di ascensori danneggiati superiore al 50% nell'area interessata dal sisma.

Sulla base di dati osservati nei terremoti di Loma Prieta del 1989 e di Northridge del 1994, partendo da studi condotti da Hesselberg *et al.* (HKA, 1992), Finley (1996) e Naeim (1997), Porter (2016) ha calcolato la probabilità di collasso e costruito le curve di fragilità, considerando come campione 47 ascensori soggetti a collasso (secondo 17 possibili tipologie di danno), di cui 29 costruiti prima del 1973, quando c'è stato un importante adeguamento delle norme negli Stati Uniti, e 18 successivamente. I valori di accelerazione di picco al terreno (PGA) sono stati ottenuti dalle registrazioni strumentali, o per interpolazione nelle località prive di strumenti. L'introduzione delle nuove norme ha portato ad una decisa diminuzione dei danni ai binari, e in generale a un miglioramento prestazionale, dove si passa da un valore medio di capacità θ di 0.32 g, a un valore di 0.39 g per impianti post-1973.

Studi sperimentali su tavola vibrante

Nell'ambito della ricerca sul comportamento sismico degli ascensori, le prove su tavola vibrante rappresentano il modo più diretto per valutare la risposta strutturale, ma al tempo stesso, la realizzazione di modelli in scala reale è onerosa in termini economici e di tempo.

Yao *et al.* (2004) hanno condotto un programma di ricerca di tre anni per studiare il comportamento meccanico del contrappeso, con particolare attenzione alle deformazioni dei binari e dei supporti. Da prove dinamiche su tavola vibrante, eseguite su una struttura in acciaio di tre piani, per due tipologie di ascensori utilizzati in Taiwan (per 8 e 15 persone), si è valutato che i supporti dei binari comunemente impiegati nella pratica progettuale subivano eccessive deformazioni, e che un sistema adeguatamente rigido può essere ottenuto con l'utilizzo di binari di classe superiore, ma soprattutto con l'inserimento di supporti trasversali intermedi fra i binari.

Uno studio recente in letteratura è quello condotto da Wang *et al.* (2017), in cui viene testata su tavola vibrante una struttura in cemento armato di cinque piani, tutti accessibili mediante ascensore, escluso il tetto, come mostrato in Fig. 02. L'ascensore è stato progettato secondo la vigente norma americana. Il programma di prova è stato suddiviso in due fasi: sette test sismici su edificio isolato alla base (BI), che hanno prodotto solo lievi danni ai muri divisorii, e sei su edificio a base fissa (FB).

Fra i principali risultati dei test sismici, in corrispondenza del test FB-5 che rappresenta un evento di progetto per la struttura, e del test FB-6, si sono osservati valori decisamente elevati di amplificazione dell'accelerazione di picco del componente, rispetto a quella del piano associato: in particolare, valori fino a 7 per la cabina e 9 per il contrappeso.

Studi numerici

Gli studi numerici sono principalmente focalizzati sulla risposta del sistema del contrappeso e dei binari. Una review dei principali studi numerici su elementi non strutturali è stata fatta da Filiatrault *et al.* (2002).

Tzou e Schiff (1987, 1988) hanno studiato numericamente il problema dell'impatto fra il contrappeso e i binari e le guide a rullo, mostrando che nella pratica progettuale il carico di impatto viene sottostimato. Segal *et al.* (1996) hanno investigato la risposta sismica del sistema del contrappeso in condizioni operative, e hanno osservato che le forze di progetto previste dalla norma americana di riferimento sono fortemente sottostimate. Singh *et al.* (2002) hanno sviluppato un modello analitico lineare per valutare il comportamento sismico nel piano e fuori piano del sistema del contrappeso, che è stato modellato come corpo rigido supportato da quattro molle equivalenti agli angoli, che tengono conto della flessibilità delle guide a rullo, dei supporti e del binario. I risultati numerici, ottenuti per valori di accelerazione di terremoti reali, mostrano che gli sforzi nell'anima del binario e nei supporti dipendono essenzialmente dall'accelerazione nel piano, mentre nelle flange la componente di accelerazione trasversale ha un peso più rilevante, e dunque andrebbe tenuta in considerazione nella progettazione.

Si è notato inoltre che lo sforzo massimo nell'ala e nell'anima del binario si ha quando il rullo superiore è posizionato intorno alla metà del piano, e che l'andamento degli sforzi, al variare della quota, dipende dalla risposta dinamica dell'edificio insieme al sistema del contrappeso, più che dall'accelerazione di piano. Infatti, nei piani bassi sono stati osservati valori di sforzo maggiori rispetto ai piani superiori della struttura. Si è infine verificato che l'utilizzo di supporti intermedi riduce in modo significativo gli sforzi sull'anima dei binari.

Quadro normativo italiano: NTC2018 e circolare applicativa

Le recenti Norme Tecniche per le Costruzioni (in vigore dal 22 marzo 2018) introducono, in modo chiaro e completo ai paragrafi 7.2.3 e 7.2.4, i diversi profili di responsabilità nella

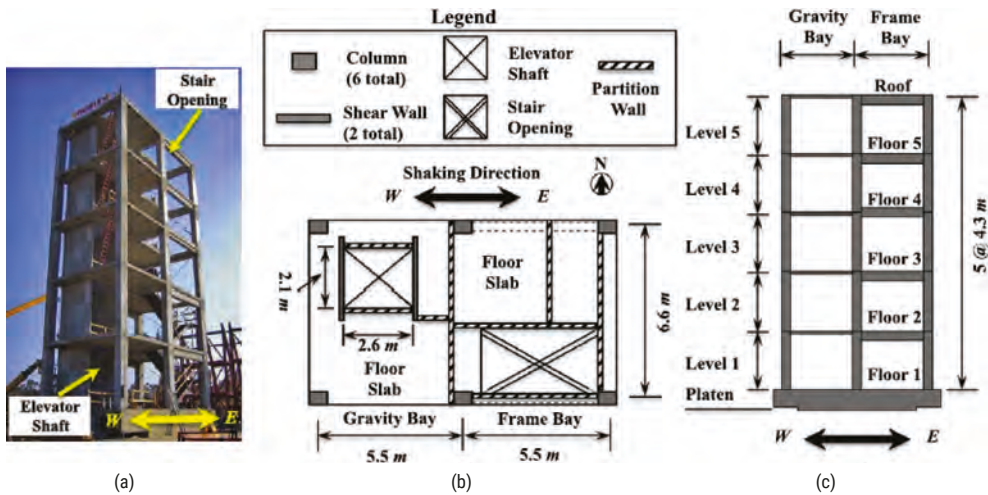


Fig.02 Schema della struttura: (a) foto; (b) pianta del piano 3; (c) vista in elevazione (non sono mostrate le pareti di taglio) [Wang, 2017].

progettazione e realizzazione degli elementi non strutturali e degli impianti. In particolare, al paragrafo 7.2.4 si precisa “della progettazione antisismica degli impianti è responsabile il produttore, della progettazione antisismica degli elementi di alimentazione e collegamento è responsabile l’installatore, della progettazione antisismica degli orizzontamenti, delle tamponature e dei tramezzi a cui si ancorano gli impianti è responsabile il progettista strutturale”, “è compito del progettista della struttura individuare la domanda, mentre è compito del fornitore e/o dell’installatore fornire impianti e sistemi di collegamento di capacità adeguata.”

È stato inoltre introdotto lo schema di verifica per le strutture di diversa classe d’uso e per i diversi stati limite introducendo, ove necessario, la verifica degli elementi non strutturali e degli impianti (Tab. 01) , coerentemente con quanto riportato nei criteri di progettazione.

Come specificato nella Circolare esplicativa del 21 gennaio 2019, la progettazione ha una articolazione di tipo multi-prestazionale e multi-strategico. I diversi livelli prestazionali fanno riferimento ai diversi stati limite, mentre le diverse strategie sono associate alla destinazione d’uso della costruzione.

È bene osservare come per gli impianti installati in strutture in Classe d’Uso (CU) III e IV allo Stato Limite di Operatività (SLO) venga richiesta la verifica in termini di funzionamento (FUN), oltre alla verifica di stabilità (STA) allo Stato Limite Ultimo (SLU) che deve essere garantita anche per strutture in Classe d’Uso II.

La verifica degli elementi non strutturali e degli impianti, richiede una corretta valutazione dell’input sismico e per questo risulta utile la definizione di spettri di risposta di piano, che possono essere determinati, a partire dalla risposta in accelerazione della struttura alla quota considerata, nell’ipotesi di assumere la struttura come una forzante armonica per l’elemento non strutturale, mettendo in conto le amplificazioni dovute agli effetti dinamici, legate al suo periodo di oscillazione e al suo coefficiente di smorzamento. La Circolare (paragrafo C7.2.3) fornisce le formule per calcolare l’accelerazione massima (risposta), normalizzata rispetto a quella di gravità, che l’elemento non strutturale subisce durante il sisma, per lo stato limite considerato.

Sempre la Circolare, al paragrafo C8.7.6, riporta le raccomandazioni per la valutazione e l’adeguamento di componenti non strutturali esistenti e per l’ancoraggio di componenti non strutturali di nuova installazione al variare della zona sismica. La Tabella C8.7.6.3.I della Cir-

STATI LIMITE		CU I	CU II			CU III e CU IV		
		ST	ST	NS	IM	ST	NS	IM
SLE	SLO					RIG		FUN
	SLD	RIG	RIG			RES		
SLU	SLV	RES	RES	STA	STA	RES	STA	STA
	SLC		DUT (**)			DUT (**)		

(*) Per le sole CU III e IV, nella categoria impianti ricadono anche gli arredi fissi.

(**) Nei casi esplicitamente indicati dalle presenti norme.

Tab.01 Stati limite di elementi strutturali primari (ST), elementi non strutturali (NS) e impianti (IM). [NTC 2018 – Tab. 7.3.III].

Accelerazione di progetto (m/s ²)	Categoria sismica dell'ascensore	Commento
$a_d < 1$		I requisiti delle EN 81-20 ed EN 81-50 sono sufficienti, di conseguenza non è richiesta alcuna azione aggiuntiva
$1 \leq a_d \leq 2.5$		Necessarie minori azioni correttive
$2.5 < a_d \leq 4$		Necessarie medie azioni correttive
$a_d > 4$		Necessarie sostanziali azioni correttive

Tab.02 Categorie sismiche degli ascensori

colore parla esplicitamente degli ascensori e per alcuni componenti (Guide, Motori e generatori, Pannelli elettrici e di controllo) ne definisce i livelli di vulnerabilità e importanza e ne raccomanda la valutazione, se in zona sismica 1 e 2.

Quadro normativo europeo: la norma EN 81-77

A livello europeo, la norma UNI EN 81-77:2019 specifica le prescrizioni speciali e le regole di sicurezza per ascensori permanentemente installati in edifici conformi alla UNI EN 1998-1 (Eurocodice 8).

Lo scopo di questa norma europea è quello di:

- Evitare la perdita di vite umane e di ridurre l'entità delle lesioni;
- Evitare che le persone restino intrappolate nell'ascensore;
- Evitare danni;
- Evitare problemi ambientali legati alla fuoriuscita di olio;
- Ridurre il numero di ascensori fuori servizio.

Come mostrato nella tabella dell'allegato A (riportata in Tab. 02), gli ascensori sono suddivisi in quattro categorie in funzione dell'accelerazione orizzontale di progetto a_d , che viene utilizzata per il calcolo delle forze sulla cabina e sul contrappeso e dei momenti sui binari dovuti all'azione sismica. L'accelerazione a_d dipende dall'accelerazione del terreno a_g su suolo A, dal tipo di suolo, dall'altezza dell'edificio e da quella massima dell'ascensore, dal periodo fondamentale della struttura, da un fattore di importanza e da un fattore di comportamento dell'elemento. Oltre alle masse proprie dei vari elementi dell'impianto, deve essere considerata una massa pari al 40% della portata negli ascensori per persone, e pari all'80% della portata negli ascensori per persone e cose.

Per ascensori di categoria 2 e 3, cabina, contrappeso e massa di bilanciamento devono essere provvisti di dispositivi antideragliamento, e, in caso di mancanza di alimentazione elettrica, l'ascensore deve essere in grado di muovere automaticamente la cabina fino al piano più vicino. Gli ascensori di categoria 3 devono essere muniti di un sistema di rilevamento sismico, con livello di attivazione minore o uguale a 1 m/s^2 e un tempo di risposta del sistema non superiore a 3 secondi. Dopo l'attivazione del sistema di rilevamento, tutte le chiamate devono essere

ignorate, e quando la cabina è al piano, l'ascensore deve aprire le porte e mettersi fuori servizio. In aggiunta a tale sistema, per gli ascensori di categoria 3 può essere previsto un sistema di rilevamento dell'onda primaria (onda P) con livello di attivazione minore o uguale a 0.1 m/s^2 . Le onde P anticipano le onde di taglio S distruttive, e il tempo di preavviso può essere di alcuni secondi. Se si attiva il sistema di rilevamento dell'onda primaria, l'ascensore deve restare fermo per 60 secondi (eventualmente dopo essersi portato al piano, se era in movimento). Se in questo frangente si attiva il rilevamento sismico, l'ascensore entra in modalità sismica, altrimenti viene commutato in funzionamento normale. La norma dunque fornisce diverse indicazioni importanti sul comportamento degli ascensori in caso di sisma, ma per essere applicata nel nostro paese necessita di un disposto legislativo che la renda obbligatoria.

La Fondazione EUCENTRE e la ricerca nel campo degli elementi non strutturali

Gli elementi non strutturali vengono tipicamente definiti come: "tutto ciò che non fa parte del sistema portante di un edificio e che non sia stato progettato per sopportare carichi (gravitazionali, eolici, sismici) al di fuori del peso proprio". In genere tali elementi vengono suddivisi in:

1. Elementi esterni (architettonici o impiantistici), come elementi di facciata, camini, parapetti, insegne pubblicitarie e antenne;
2. Attrezzature meccaniche o elettriche, come impianti per la climatizzazione, ascensori, sistemi antincendio, cavi elettrici e tubazioni idrauliche;
3. Contenuto dell'edificio, che include tutti gli elementi necessari per rendere funzionali gli spazi, come mobili, porte, elettrodomestici, controsoffitti ed elementi interni di partizione.

Gli elementi non strutturali durante un evento sismico sono inevitabilmente sottoposti a sollecitazioni dinamiche e possono danneggiarsi o raggiungere una condizione di collasso, per cui, anche nell'ipotesi che il sistema strutturale abbia adempiuto efficacemente al suo compito, il collasso o anche il solo danneggiamento degli elementi non strutturali può influire e condizionare pesantemente le reali prestazioni e le funzionalità post-sismiche di un edificio; si pensi, per esempio, a quali potrebbero essere le conseguenze del crollo anche solo parziale dei controsoffitti, a quello delle partizioni interne, al danneggiamento degli impianti ed alla conseguente interruzione delle attività. Il valore economico degli elementi non strutturali di solito supera ampiamente quello delle strutture e questo sbilanciamento è ulteriormente accentuato nel caso di ospedali, alberghi, impianti produttivi ed edifici critici in genere. Non solo, tali perdite possono essere significative anche quando, per terremoti di bassa intensità, le strutture subiscono un livello di danneggiamento modesto o nullo.

Non meno trascurabile è il rischio indotto: si pensi al caso di elementi non strutturali di dimensioni e massa notevoli (scaffalature industriali, magazzini automatici) o legati alla sicurezza dell'ambiente circostante (impianti antincendio, linee di distribuzione di gas o liquidi infiammabili) che potrebbero causare anche perdite umane conseguentemente al loro crollo o danneggiamento. Recenti lavori auspicano per tali motivi che gli elementi non strutturali vengano considerati "parte integrante della progettazione ed analisi sismica di un edificio" (Calvi *et al.*, 2015).

La ricerca e i laboratori

La conoscenza del reale comportamento sismico degli elementi non strutturali è dunque 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 (in genere in combinazione con prove sperimentali);
- prove dinamiche su tavola vibrante (o eventualmente prove quasi statiche, generalmente in controllo di spostamento);



Fig.03 Telaio posizionato sulla tavola vibrante multiassiale per prova di risposta sismica di un controsoffitto. *Archivio della Fondazione EUCENTRE*

Fig.04 Sistema di prova per la caratterizzazione di elementi drift-sensitive. *Archivio della Fondazione EUCENTRE*

- confronti diretti con elementi non strutturali simili che abbiano subito e superato un evento sismico.

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, UNI EN 81-77:2019 per gli ascensori), ma a livello generale non esistono indicazioni e, quando presenti, non sono cogenti.

Le attività di ricerca e sperimentazione vengono svolte in 4 laboratori:

- ShakeLab in cui è possibile riprodurre qualsiasi evento sismico sino ad oggi registrato, su prototipi di grandi dimensioni ed edifici in scala reale, tramite un simulatore di terremoti monoassiale. È inoltre presente un sistema per prove su dispositivi di appoggio e isolamento in scala reale, a cinque gradi di libertà; infine è possibile eseguire prove pseudo-statiche e pseudo-dinamiche mediante apposita struttura di contrasto;
- MobiLab, che consente di effettuare prove e misure sul posto funzionali alla valutazione della vulnerabilità degli edifici e delle infrastrutture;
- DataLab, che produce analisi di rischio e scenari di danno mediante piattaforme WEB GIS che utilizzano i dati di esposizione, vulnerabilità e pericolosità;
- 6DLab, in cui è presente un simulatore di terremoti multiassiale e un sistema per prove su smorzatori e ritegni dinamici di grandi dimensioni.

La tavola vibrante a 6 gradi di libertà disponibile presso il 6DLab e inaugurata nel 2017 nasce, su progetto EUCENTRE, proprio per lo studio delle prestazioni sismiche di elementi non strutturali, ha una dimensione di 5 m x 5 m e consente di sollecitare qualsiasi elemento contemporaneamente lungo le tre direzioni longitudinale, trasversale e verticale.

Proprio recentemente è stato realizzato un telaio rigido in acciaio per la caratterizzazione della risposta sismica su tavola vibrante di elementi non strutturali sensibili alle accelerazioni e collegati a parete o soffitto, come ad esempio controsoffitti (Fig. 03), pareti divisorie, facciate, unità trattamento aria, apparecchiature sospese, etc. che potrebbe consentire la verifica di collegamento e funzionamento anche per elementi ascensoristici quali ad esempio i pannelli di controllo.

Sempre presso il 6DLab, un ulteriore importante sviluppo, il cui completamento è previsto per la metà del 2020, è la realizzazione di una struttura di prova per la simulazione sismica di effetti interpiano. Si tratta di una 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 (Fig. 04). Questa nuova configurazione permetterà di simulare la risposta relativa di qualsiasi coppia contigua di piani di edifici a qualunque altezza. La struttura di prova sarà particolarmente adatta per lo studio di elementi sensibili allo spostamento interpiano e quindi, ad esempio, potrebbe consentire la verifica della deformazione della cabina o dei binari, del danneggiamento dei sistemi di ancoraggio e del deragliamento di cabina e contrappeso.

Conclusioni

La progettazione antisismica delle strutture ha come obiettivo primario quello di salvaguardare la sicurezza delle persone e prevenire il collasso; tuttavia, eventi di una certa magnitudo possono produrre ingenti danni agli elementi non strutturali, con conseguenze rilevanti in termini economici, e soprattutto la perdita di funzionalità in strutture di importanza strategica come gli ospedali.

Nonostante la presenza di accorgimenti antisismici, numerosi sono i danni subiti dagli ascensori a seguito di terremoti, e, fra le varie problematiche, si sono anche riscontrate mancate o errate attivazioni dei sistemi di rilevamento e danni dovuti alla riattivazione degli ascensori (messi fuori servizio dai dispositivi) prima che venissero ispezionati da personale qualificato (Schiff, 1988, Suarez *et al.*, 2000).

È evidente, comunque, anche sulla base di analisi statistiche dei danneggiamenti a seguito di eventi sismici (Porter, 2016), come interventi di adeguamento possano portare a una decisa riduzione dei danni. Lo studio dei danni osservati nei passati terremoti, pertanto, insieme a prove sperimentali su tavola vibrante e studi numerici è di fondamentale importanza per conoscere le prestazioni, capire quali siano gli elementi più vulnerabili e trarre informazioni utili per l'adeguamento delle norme. Nonostante la ricerca scientifica e il contesto normativo nazionale ed internazionale certamente forniscano degli ottimi strumenti per la corretta progettazione degli impianti ascensoristici e alcune grandi aziende stiano affrontando il problema, la mancanza di obblighi legislativi specifici, rende l'implementazione di soluzioni antisismiche ancora disattesa, specialmente nel contesto italiano.

A tal fine è bene rimarcare quanto emerso in un recente approfondimento a cura degli avvocati Cocco e Bertolini (2019) in materia di responsabilità extracontrattuale per i progettisti. Si sottolinea come la giurisprudenza abbia progressivamente ampliato la nozione “gravi vizi”, tanto da comprendere sia le deficienze costruttive vere e proprie, sia le carenze ed erronee previsioni progettuali, con la precisazione che fra i difetti di costruzione vanno compresi, non solo i casi di rovina parziale o totale dell'edificio ma anche quei vizi che, pur non incidendo sulla statica e sulla struttura dell'immobile, pregiudicano in modo grave la funzione cui questo è destinato. È quindi evidente che nella nozione rientrano anche gli elementi non strutturali e gli impianti, e quindi gli ascensori.

Bibliografia

- Calvi, P. M., Moratti, M., Filiatrault, A. (2015). *Studio della risposta di elementi non strutturali di edifici scolastici soggetti ad eventi sismici*. Progettazione Sismica 3. Pavia: EUCENTRE.
- Cocco M., Bertolini, C. (2019). *Obblighi e responsabilità per il progettista con particolare riferimento agli elementi non strutturali e agli impianti nel caso di rischio terremoto*. Progettazione Sismica 2. Pavia: EUCENTRE.
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Decreto Ministeriale del 17 gennaio 2018. *Aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana 42.
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Decreto Ministeriale del 21 gennaio 2019. *Istruzioni per l'applicazione dell'“Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni” di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana 35.

- Ding, D., C. Arnold, H. Lagorio, S. Tobriner, S. Rihal, R. Mangum, G. Hezmalhalch et al. (1990). Architecture, building contents, and building systems. *Earthquake Spectra*, vol. 6, n. S1, pp. 339-377.
- Du, P. (2008). From the Wenchuan Seism: statistics and analysis of elevator damages. In *Xi'an. Elevator World*, vol. 56, n. 11, pp. 114-117.
- Filiatrault, A., Christopoulos, C., Stearns, C. (2002). *Guidelines, specifications, and seismic performance characterization of nonstructural building components and equipment*. Pacific Earthquake Engineering Research Center. San Diego: University of California.
- Finley, J., Anderson, D., Kwan, L. (1996). Report on the Northridge earthquake impacts to hospital elevators. *Contract*, n. 94-5122.
- Hesselberg, K. and Associates Inc. (1992). *Report on the Loma Prieta Earthquake Impacts to Hospital Elevators*. Sacramento: Office of Statewide Health Planning and Development.
- Miranda, E., Mosqueda, G., Retamales, R., Pekcan, G. (2012). Performance of nonstructural components during the 27 February 2010 Chile earthquake. *Earthquake Spectra*, vol. 28, n. S1, pp. S453-S471.
- Naeim, F. (1997). *Response of Instrumented Buildings to 1994 Northridge Earthquake, An Interactive Information System*.
- Porter, K. (2016). Seismic fragility of traction elevators. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 45, n. 5, pp. 819-833.
- Schiff, A. J. (1988). The Whittier Narrows, California earthquake of October 1, 1987—Response of lifelines and their effect on emergency response. *Earthquake Spectra*, vol. 4, n. 2, pp. 339-366.
- Segal, F., Rutenberg, A., Levy, R. (1996). Earthquake response of structure-elevator system. *Journal of structural engineering*, vol. 122, n. 6, pp. 607-616.
- Singh, M. P., Suarez, L. E. (2002). Seismic response of rail-counterweight systems in elevators. *Earthquake engineering & structural dynamics*, vol. 31, n. 2, pp. 281-303.
- Suarez, L. E., Singh, M. P. (2000). Review of earthquake performance, seismic codes, and dynamic analysis of elevators. *Earthquake spectra*, vol. 16, n. 4, pp. 853-878.
- Swerrie, D. A. (1991). Enhancing elevator passenger safety and mitigating elevator damage during earthquakes. In *Proceedings of the 2nd Conference on Tall Buildings in Seismic Regions*, pp. 393-401. Los Angeles: Council on Tall Buildings and Urban Habitat.
- Tattoli, P. (2017). UNI EN 81-77 Ascensori sottoposti ad azioni sismiche. In *E2 Forum elevator-escalator lab*. <https://e2forum.it/wp-content/uploads/2017/06/paolo-tattoli.pdf>
- Tzou, H. S., Schiff, A. J. (1987). Development and evaluation of a pseudo-force approximation applied to nonlinear dynamic contacts and viscoelastic damping. *Computers & structures*, vol. 26, n. 3, pp. 481-493.
- Tzou, H. S., Schiff, A. J. (1988). Structural dynamics of elevator counterweight systems and evaluation of passive constraint. *Journal of structural engineering*, vol. 114, n. 4, pp. 783-803.
- UNI EN 81-77:2019. *Regole di sicurezza per la costruzione e l'installazione degli ascensori - Applicazioni particolari per ascensori per persone e per merci - Parte 77: Ascensori sottoposti ad azioni sismiche*.
- Wada, T., Kitamura, S. (1995). Report on elevator/escalator damage by the Hyogo-Ken Nanbu earthquake. *Elevator World*, vol. 43, n. 11, pp. 111-115.
- 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 engineering & structural dynamics*, vol. 46, n. 3, pp. 391-407.
- Yao, G. C., Tseng, C. C., Shen, T. H. (2004). Elevator CW derailment research in Taiwan. In *Proc. of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver.
- Yavari, S., Chang, S. E., Elwood, K. J. (2010). Modelling post-earthquake functionality of regional health care facilities. *Earthquake spectra*, vol. 26, n. 3, pp. 869-892.