

Analisi sperimentale mediante prove su tavola vibrante della distribuzione della richiesta sismica su componenti non strutturali

Experimental shake table analysis of the seismic demand distribution on non-structural components

Luigi Di Sarno¹, Crescenzo Petrone², Gennaro Magliulo³, Giuseppe Maddaloni⁴, Edoardo Cosenza⁵ ■

Sommario

L'operatività post-terremoto di strutture strategiche come gli ospedali è un obiettivo prestazionale fondamentale da garantire in una società moderna, sviluppata, efficiente e resiliente. Tale prestazione dipende fondamentalmente dal danneggiamento di parti strutturali e non strutturali. Se negli anni precedenti l'attenzione era concentrata solo sui componenti strutturali, oggi, l'attenzione va concentrata anche su quelli non strutturali. Diverse recenti esperienze di campo hanno evidenziato numerosi danni prodotti in tali componenti in seguito ai recenti terremoti. Gli studi sugli elementi non strutturali hanno portato il Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura dell'Università di Napoli Federico II ad effettuare numerose e per certi versi pionieristiche sperimentazioni quali prove su tavola vibrante in scala reale, per indagare il comportamento sismico di alcuni componenti ospedalieri. Si è scelto di testare una tipica stanza ambulatoriale concentrando l'attenzione sui seguenti componenti: due armadi con differenti snellezze, una scrivania, un monitor/case e diversi contenitori in vetro.

In questo lavoro si presenta una proposta e validazione di un modello per il calcolo dell'accelerazione lungo l'altezza di componenti non strutturali del tipo "armadio". Tale operazione è effettuata a partire dall'evidenza sperimentale riscontrata in seguito all'esecuzione delle citate prove su tavola vibrante.

Parole chiave: Prove su tavola vibrante, domanda sismica, componenti non-strutturali, progetto sismico, risposta sismica, analisi dinamica.

Abstract

The postearthquake operation of strategic facilities such as the hospitals is a fundamental performance target to be ensured in a modern, developed, efficient and resilient community. This performance depends on the damage to structural and nonstructural components. While in the previous years the attention was focused mainly on structural components, nowadays the attention should be also focused on nonstructural components. Several recent field surveys have shown significant damage to nonstructural components.

Studies on nonstructural components have led the Department of Structures for Engineering and Architecture at the University of Naples Federico II to initiate many pioneering researches such as shake table tests in real scale, to investigate the seismic behavior of some hospital building s components. A typical ambulatory room is tested focusing on the following components: two cabinets with different slenderness, a desk, a monitor and different glass contents.

In this paper a method for estimating the seismic demand acceleration on nonstructural components, such as freestanding cabinets, is proposed and validated. Such a proposal is based on the experimental evidence of the aforementioned shaking table tests.

Keywords: Shake table tests, seismic demand, non structural components, seismic design, earthquake response, dynamic analysis.

1. Introduzione

L'impatto socio-economico dei recenti terremoti che hanno colpito il nostro Paese (vedi per esem-

pio L'Aquila, 2009 (Figura 1) (Casarotti et al., 2009) l'Emilia, 2012, unitamente ai notevoli progressi nel campo dell'ingegneria sismica, ha por-

¹ Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi del Sannio - ✉ ldisarno@unisannio.it

² Dipartimento di Strutture per l'ingegneria e l'architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II - ✉ crescenzo.petrone@unina.it

³ Dipartimento di Strutture per l'ingegneria e l'architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II - ✉ gmagliul@unina.it

⁴ Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi Di Napoli Parthenope - ✉ giuseppe.maddaloni@uniparthenope.it

⁵ Dipartimento di Strutture per l'ingegneria e l'architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II - ✉ cosenza@unina.it

tato le istituzioni nazionali ad intraprendere una decisa azione di mitigazione del rischio sismico attraverso diverse iniziative, tra cui la revisione, ormai attesa da tempo, delle norme tecniche per le costruzioni (NTC2008) (Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 2008). Gli obiettivi di tale azione di mitigazione sono sia la riduzione dell'impatto economico di un evento sismico attraverso l'introduzione di regole di costruzione più severe e dettagliate che la minimizzazione dell'impatto sociale garantendo la funzionalità dei servizi essenziali attraverso la definizione di obiettivi prestazionali più stringenti per le opere strategiche. Tali iniziative risultano in linea anche con le più avanzate indicazioni normative e linee guida presenti in altri paesi a medio ed elevato rischio sismico, quali per esempio Canada, Stati Uniti, Giappone e Nuova Zelanda (American Society of Civil Engineers, 2010; International Code Council (ICC), 2000).

La riduzione del rischio sismico dei sistemi ospedalieri è senz'altro uno degli obiettivi delle NTC2008 e della loro revisione e futura evoluzione. Molto importante è la funzionalità post-terremoto di strutture strategiche come gli ospedali. Tale funzionalità dipende fondamentalmente dal danneggiamento sia di parti strutturali che non strutturali nell'accezione più ampia; infatti, un ospedale può resistere ad un terremoto

ma presentare danni alle parti non strutturali (collasso del controsoffitto, caduta di un mobile o rovesciamento di sostanze pericolose, rottura di macchinari, rottura degli impianti, ecc.) che ne compromettono l'operatività.

Gli ospedali, le aziende sanitarie di rilevanza nazionale, i pronto soccorso (DEA) e tutte le strutture considerate Poli di Emergenza, quindi di primaria importanza ai fini della protezione civile, sono opere strategiche di Classe IV: il corrispondente periodo di riferimento è di 200 anni. Si precisa che, tenendo conto della valutazione delle perdite attese, è consigliabile, laddove possibile ed economicamente sostenibile, considerare tutte le strutture sanitarie, quindi anche ambulatori ed ospedali per lunga degenza, quali strutture strategiche e quindi caratterizzate da un valore del periodo di riferimento pari a 200 anni.

La sicurezza sismica (livello di protezione) è determinata dall'associazione della prestazione attesa (gli stati limite) con un livello d'intensità sismica caratterizzato da un'assegnata probabilità di superamento P_{VR} nella vita di riferimento V_R dell'opera. I valori di P_{VR} indicati nelle NTC2008 sono riportati in Tabella 1, dove è anche indicato il corrispondente periodo medio di ritorno T_R dell'evento sismico per $V_R=200$ anni. Nella stessa tabella sono indicati anche i valori di T_R corrispondenti al superamento delle

Tabella 1 - Valori di P_{VR} (NTC2008, T3.2.1) e di T_R (in anni)

	Stato limite	P_{VR}	T_R	T_R
			$V_R = 200$ anni	$V_R = 50$ anni
Esercizio	SLO (operatività)	81%	120	30
	SLD (danno)	63%	201	50
Ultimi	SLV (salvaguardia della via)	10%	1900	475
	SLC (collasso)	5%	3900	975

Figura 1. Danneggiamento di componenti non strutturali nell'Ospedale San Salvatore a L'Aquila a seguito del terremoto del 2009.



assegnate P_{VR} in 50 anni, che è l'intervallo temporale storicamente utilizzato nel nostro Paese (e tuttora vigente per gli edifici ordinari). Il confronto tra i differenti periodi di ritorno permette una rapida valutazione dell'importanza relativa degli eventi sismici di progetto suggeriti nelle vigenti norme per le due categorie di edifici.

Se nei decenni passati l'attenzione era concentrata soprattutto sui componenti strutturali, oggi l'attenzione è principalmente concentrata su quelli non strutturali (tra gli altri), in quanto i danni riguardano principalmente tali componenti (Yavari et al., 2010). Quanto detto è legato anche ad un problema di natura economica: basti pensare che per gli ospedali il costo degli elementi non strutturali è circa 80-90% del costo totale della costruzione, mentre per le abitazioni e gli uffici è circa il 60% (Taghavi and Miranda, 2003). Tradizionalmente, viene data poca importanza agli elementi non strutturali durante la progettazione sismica delle strutture, al punto che molte normative sono carenti relativamente a tali elementi.

I temi da approfondire possono essere individuati a partire dai due fattori che caratterizzano, ai fini della valutazione della sicurezza sismica, il sistema ospedale rispetto alle altre tipologie di edifici (residenziali, uffici, servizi, etc.):

- Il contributo dei componenti non strutturali per la funzionalità dell'ospedale, anche a seguito di un intenso evento sismico;
- Il conflitto tra la necessità di somministrazione continua dei servizi medici e le eventuali attività di indagine conoscitiva e di esecuzione dei lavori.

Gli aspetti che necessitano di ulteriore approfondimento possono essere raggruppati in tre grandi aree:

- Specifiche di dettaglio su vari argomenti (obiettivi di sicurezza, vulnerabilità degli elementi strutturali e degli impianti, etc.);
- Scelta della strategia di intervento di miglioramento ovvero di adeguamento;
- Pianificazione delle attività d'indagine e di verifica e delle modalità di esecuzione dell'intervento.

A ciascuna area corrisponde una delle macro-attività in cui può essere suddiviso il processo di adeguamento di un ospedale esistente, precisamente:

- La verifica di sicurezza dell'esistente;
- Il progetto dell'intervento di miglioramento o di adeguamento;
- La pianificazione e la gestione del processo.

Le prime due attività, comuni anche alle altre opere, sono inquadrare con sufficiente chiarezza dalla normativa vigente. Le verifiche di sicurezza degli ospedali esistenti possono essere eseguite in sostanziale accordo con le indicazioni contenute nelle NTC2008. In particolare,

le NTC2008 forniscono adeguati strumenti per la scelta degli obiettivi di sicurezza e per la rappresentazione del moto sismico. I punti che richiedono approfondimenti sono i seguenti:

- A. Obiettivi di sicurezza per gli ospedali;
- B. Indagini conoscitive negli ospedali;
- C. Elementi non-strutturali;
- D. Indicatori *avanzati* per misurare le prestazioni del sistema ospedaliero.

La terza attività, la pianificazione e la gestione del processo, non è trattata nella normativa, pur essendone riconosciuta l'importanza nell'esame dei sistemi complessi. Tale carenza costituisce motivo del ritardo e dell'inerzia riscontrata nell'adeguamento sismico delle strutture in genere, e degli ospedali in particolare. La pianificazione ha un duplice scopo:

- A. Minimizzare le interferenze tra attività ingegneristiche e sanitarie;
- B. Coinvolgere tutti i soggetti potenzialmente interessati da tali attività (management dell'ospedale, responsabili sanitari, i tecnici incaricati, etc.).

Quindi per applicare le norme al caso degli ospedali, poiché sono sistemi ben più complessi dei normali edifici, sono necessarie alcune considerazioni aggiuntive e delle specifiche più dettagliate rispetto a quanto contenuto nelle norme esistenti.

Qualificare da un punto di vista sismico i componenti non strutturali risulta fondamentale per un'analisi accurata di un qualsiasi edificio nel suo complesso, in particolare per gli ospedali. La qualificazione consiste nel verificare il raggiungimento di alcuni obiettivi di comportamento (Magliulo et al., 2012a; Magliulo et al., 2014; Magliulo et al., 2012b). Per i componenti non strutturali, in funzione alla loro "importanza", possono essere definiti due differenti obiettivi prestazionali. In particolare l'ASCE 7 definisce tali componenti "critici", per i quali deve essere usato un fattore di importanza pari a 1.5, se almeno una delle seguenti condizioni è verificata:

1. È richiesto al componente di continuare ad assolvere la sua funzione, per la sicurezza umana, anche dopo il terremoto; sono inclusi sistemi di protezione antincendio e le scale di uscita;
2. Il componente convoglia, sostiene o contiene sostanze tossiche, altamente tossiche o sostanze esplosive, dove la quantità di materiale supera un quantitativo soglia stabilito dall'autorità competente ed è sufficiente a rappresentare una minaccia per il pubblico, se rilasciato;
3. Il componente si trova all'interno o è collegato ad una struttura strategica ed è neces-

sario per il funzionamento continuo della struttura, o il suo collasso potrebbe compromettere il funzionamento della struttura;

4. Il componente convoglia, sostiene o contiene sostanze pericolose ed è collegato ad una struttura o a parte di essa classificata dall'autorità competente come occupazione pericolosa.

Va osservato che la normativa statunitense ASCE 7 (§13.2.2 ASCE/SEI 7-10) prevede già di testare in maniera dinamica i componenti non strutturali critici attraverso un protocollo di prova specifico, l'AC 156 (International Conference of Building Officials (ICBO), 2000). Si auspica che in un futuro prossimo sia la normativa europea che quella nazionale adotteranno la stessa procedura.

Recenti studi su disastri ospedalieri (Miranda et al., 2012; Yavari et al., 2010) hanno messo in evidenza la necessità di conoscere meglio le proprietà sismiche degli elementi non strutturali, in quanto questi ultimi sono necessari per l'operatività dell'ospedale, soprattutto in condizioni di gestione dell'emergenza sismica. Negli ultimi anni, grazie anche al progresso scientifico, gli studi sugli elementi non strutturali hanno portato numerose università e gruppi di ricerca ad effettuare sperimentazioni quali prove su tavola vibrante in scala reale, per indagare il comportamento sismico di alcuni componenti ospedalieri essenziali per la funzionalità e l'operatività dell'ospedale in seguito ad un'emergenza sismica. In particolare, presso il Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura dell'Università di Napoli Federico II, nell'ambito delle attività finanziate dal Consorzio ReLUIS, centro di competenza del Dipartimento della Protezione Civile, sono state recentemente eseguite delle prove dinamiche su tavola vibrante su una

sottostruttura costituita da una stanza ambulatoriale, al fine di analizzare il comportamento sismico di alcuni elementi nonché dei contenuti di una struttura ospedaliera (Cosenza et al., 2014). Sono state analizzate diverse configurazioni per ogni componente e per l'intera stanza, così come meglio dettagliate nel seguito.

2. Descrizione dell'attività sperimentale

Le prove sismiche sui contenuti della stanza ospedaliera sono state effettuate utilizzando il sistema di tavole vibranti presente nel laboratorio del Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura dell'Università di Napoli Federico II. Più specificatamente, il sistema è costituito da due tavole vibranti bidirezionali di dimensioni in pianta 3 m x 3 m. Dal punto di vista prestazionale, ogni tavola ha un payload di 200 kN, mentre la frequenza di utilizzo è compresa tra 0 e 50 Hz. La massima accelerazione raggiungibile da ciascuna tavola a pieno carico è di 1 g, mentre lo spostamento totale massimo è pari a 500 mm (± 250 mm). Per tale campagna sperimentale è stata utilizzata un'unica tavola vibrante, attivata unidirezionalmente.

Poiché con il presente lavoro si è posto come obiettivo quello di caratterizzare l'operatività delle strutture ospedaliere, si è scelto uno specifico ambiente di prova ambulatoriale (Figura 2) che potesse essere riprodotto sulla tavola vibrante.

Per una corretta definizione delle caratteristiche di una tipica sala ambulatoriale, si è fatto riferimento alla normativa vigente in materia, consultabile sul sito www.regione.campania.it nel documento "Requisiti minimi strutturali, tecnologici e organizzativi per le strutture che erogano prestazioni di assistenza specialistica in regime ambulatoriale" (Burc N. 02 dell'11 Gennaio

Figura 2
Stanza ambulatoriale.



2002, 2002). Tale documento, oltre a sottolineare che i locali e gli spazi devono essere correlati alla tipologia ed al volume delle prestazioni erogate, definisce i requisiti minimi strutturali per l'erogazione di servizi in regime ambulatoriale. In particolare, come mostrato in Figura 3, gli elementi inseriti all'interno della stanza ambulatoriale di prova sono:

- un armadietto ambulatoriale, in lamiera d'acciaio, di dimensioni 80 x 60 x 165 cm, con due ante in vetro e cinque ripiani, Figura 3a;
- un armadietto ambulatoriale, in lamiera d'acciaio, di dimensioni 53 x 36 x 144 cm, con un'anta in vetro e quattro ripiani, Figura 3a;
- un computer da scrivania (monitor, case e mouse), Figura 3c;
- una scrivania di tipo ambulatoriale con cassettiera, Figura 3c;
- un negatoscopio a parete, Figura 3b.

La massa dei due armadi è di 20 kg e 15 kg, rispettivamente per l'armadio a due ante e quello ad un'anta, mentre la massa della scrivania è pari a 31.6 kg. Diversi contenuti ospedalieri con snellezza variabile, come bottiglie di vetro, flaconi e provette, sono collocati negli armadi per simulare le condizioni reali di una tipica stanza di ospedale. Inoltre sono state considerate diverse distribuzioni di massa per tali

contenuti negli armadi a singola e doppia anta. La definizione di prove su tavola vibrante sui contenuti in ambito ospedaliero deve presupporre uno studio volto alla definizione dei parametri che influenzano la risposta sismica di tali contenuti. Per questo motivo, in base agli studi bibliografici sul tema (Kuo et al., 2011), si è cercato di valutare i diversi parametri che possano influenzare in modo significativo la domanda e la capacità dei contenuti in ambito ospedaliero. Individuate le variabili principali, è possibile definire le diverse campagne di prova capaci di rappresentare l'influenza di ciascun parametro sul comportamento del sistema analizzato. Sono state considerate due tipologie di disposizione in pianta dell'arredo, così da evidenziarne le differenze quando l'input sismico (monodirezionale) agisce nella direzione trasversale o longitudinale dell'elemento stesso. Si riportano in Figura 4 le due disposizioni in pianta ed in Figura 5 una riproduzione tridimensionale dell'insieme del sistema analizzato.

La definizione di una condizione realistica degli armadietti per le simulazioni, è una questione cruciale per lo studio in esame. Sono state considerate diverse variabili, legate alla disposizione del contenuto sui diversi ripiani e alla posizione degli armadi rispetto alla parete. Si sceglie di non vincolare in testa gli armadi e di serrare le

Figura 3 Particolari del setup di prove.

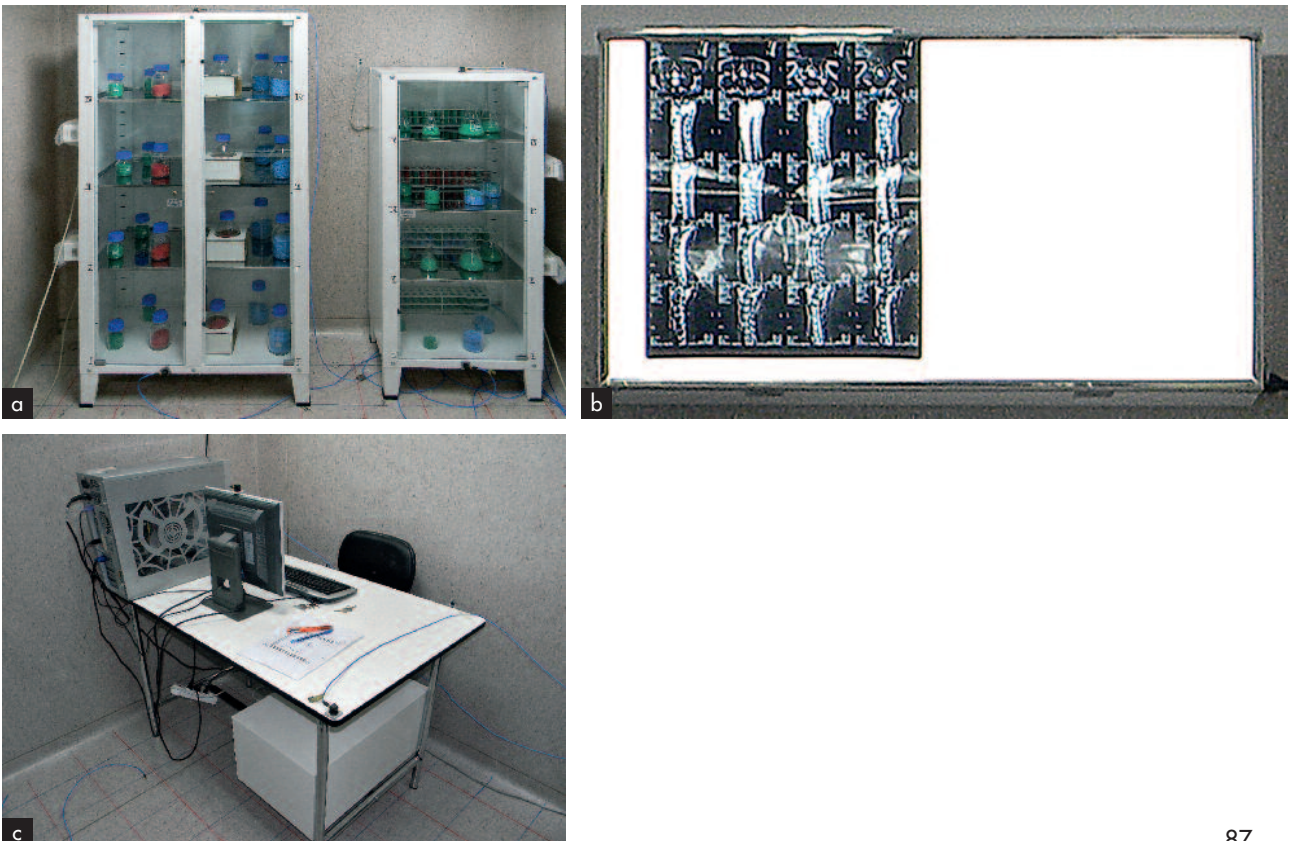


Figura 4
Disposizione in pianta degli
arredi nelle due
configurazioni.

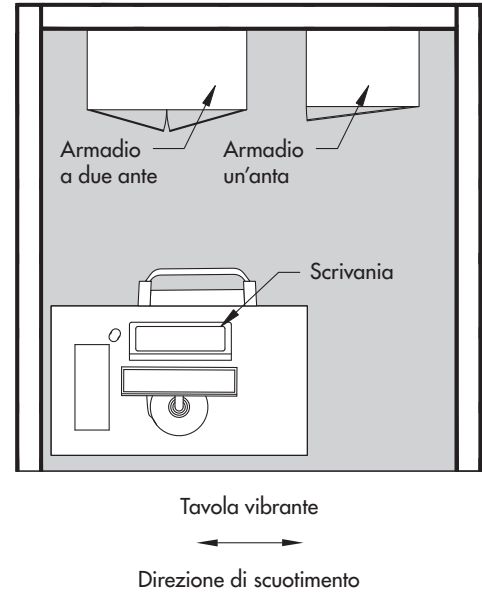
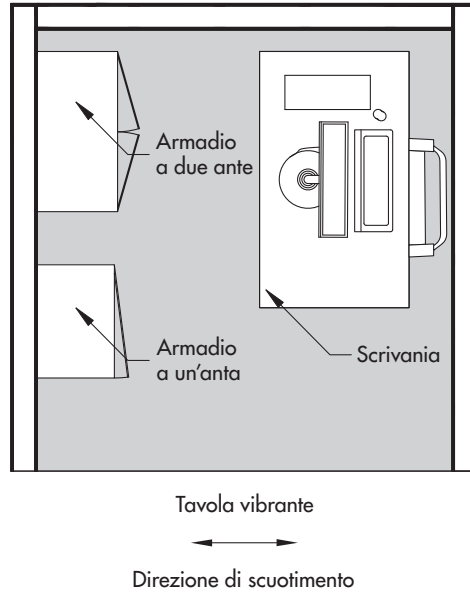
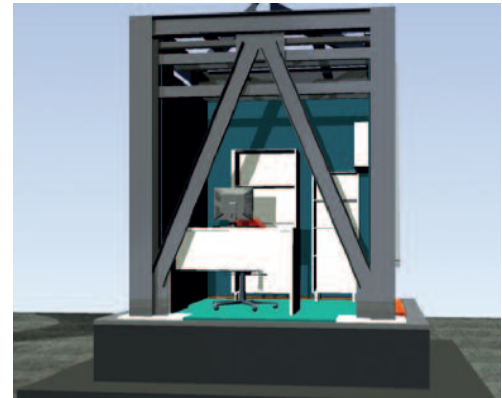
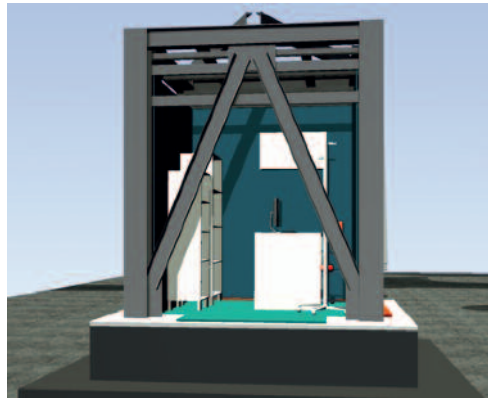


Figura 5
Due diverse disposizioni in
pianta dei contenuti:
disposizione 1 (a sinistra) e
disposizione 2 (a destra).



vetrine degli stessi, in quanto rappresentativi di situazioni tipiche di stanze ambulatoriali. Dunque, si individuano sei gruppi di prove sperimentali (Tabella 2). Nel gruppo di prove 100 si valuta il comportamento dell'armadio con una massa equivalente, cioè sabbia inserita in scatole, ad ogni ripiano degli armadi. Vengono aggiunti 6 kg e 4 kg di massa per ogni ripiano rispettivamente dell'armadio a due ante e dell'armadio ad una anta, come mostrato in Figura 6a; la quantità di massa è rappresentativa della massa dei contenuti tipicamente inseriti in tali armadi. È richiesto l'uso della massa equivalente al fine di studiare il comportamento degli armadi con differenti contenuti ai diversi ripiani; i contenuti sono simulati attraverso l'uso di scatole di sabbia per evitare di sostituire il contenuto dopo ogni scuotimento. Nel gruppo di prove 200 si indaga il comportamento degli armadi con una distribuzione di massa decrescente lungo l'altezza. Dalla base alla sommità, sui quattro scaffali dell'armadio a due ante, sono collocati

masse da 6 kg, 4 kg, 4 kg e 2 kg. Invece, sui quattro scaffali dell'armadio ad una anta, sono collocati masse da 4 kg, 2 kg, 2 kg e 0 kg, come mostrato in Figura 6b. L'obiettivo è quello di studiare il comportamento degli armadi in cui, come tipicamente suggerito dall'evidenza di dati raccolti per tipiche strutture ambulatoriali, i contenuti più pesanti sono collocati sui ripiani più bassi. Nel gruppo di prove 300 sono testate tipiche provette di vetro come mostrato in Figura 6c. I contenuti sono ugualmente inseriti sui diversi ripiani di ogni armadio. Essi sono riempiti con sabbia colorata, che simula la presenza di un liquido. In questo gruppo di prove si è indagato il comportamento di contenuti reali. Nei gruppi di prova 400, 500 e 600 vengono scelte le stesse configurazioni di massa dei gruppi di test 100, 200 e 300, rispettivamente. Tuttavia, i vari componenti sono disposti in modo tale da essere sollecitati lungo la direzione ortogonale, secondo la disposizione 2 di Figura 5, dato il moto in ingresso unidirezionale.



Figura 6
Armadio a due ante:
a) gruppi di prove 100 e 400,
b) gruppi di prove 200 e 500,
c) gruppi di prove 300 e 600.

Tabella 2 - Definizione del programma di prove

Gruppo di prove	Configurazione in pianta	Contenuti degli armadi	Distanza dalla parete (cm)
100	1	Massa equivalente uniformemente distribuita lungo l'altezza	2
200	1	Massa equivalente non uniformemente distribuita lungo l'altezza	2
300	1	Massa reale uniformemente distribuita lungo l'altezza	2
400	2	Massa equivalente uniformemente distribuita lungo l'altezza	2
500	2	Massa equivalente non uniformemente distribuita lungo l'altezza	2
600	2	Massa reale uniformemente distribuita lungo l'altezza	2

Per la costruzione della struttura della stanza si è utilizzato un telaio in acciaio rigido idoneo per analizzare il comportamento di componenti non strutturali sensibili alle accelerazioni (Magliulo et al., 2012a). Dal modello analizzato con il software SAP2000 (CSI Computer & Structures Inc., 2004) del telaio in esame, si è riscontrato un periodo fondamentale pari a 0.05 s. Per rendere il tutto conforme ad una vera stanza ambulatoriale si è deciso di utilizzare il linoleum per il pavimento e per le pareti, con spigoli arrotondati (Figura 3c).

Per studiare il comportamento sismico della stanza ospedaliera, sono stati selezionati una serie di accelerogrammi utilizzati come input per

gli scuotimenti unidirezionali orizzontali (Figura 7) che sono stati scelti adeguatamente per soddisfare lo spettro di risposta target previsto dalla norma ICBO AC156 "Acceptance criteria for seismic qualification testing of nonstructural components" (International Conference of Building Officials (ICBO), 2000). In questo lavoro si fa riferimento alle normative americane come l'AC156 e le FEMA 461 (Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2007), per la mancanza di protocolli europei/italiani in materia.

Quello di Figura 7 è un accelerogramma artificiale (Magliulo et al., 2012a) che viene scalato a diversi livelli di intensità che variano tra 0.15 g e 1.80 g nelle diverse prove. Tale accelero-

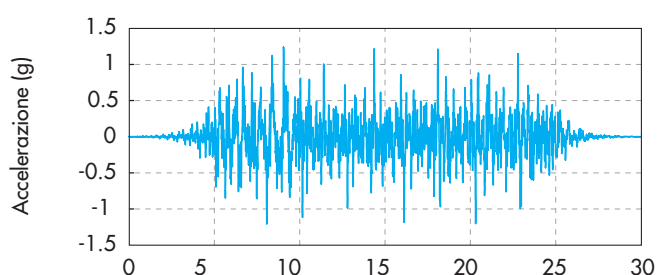
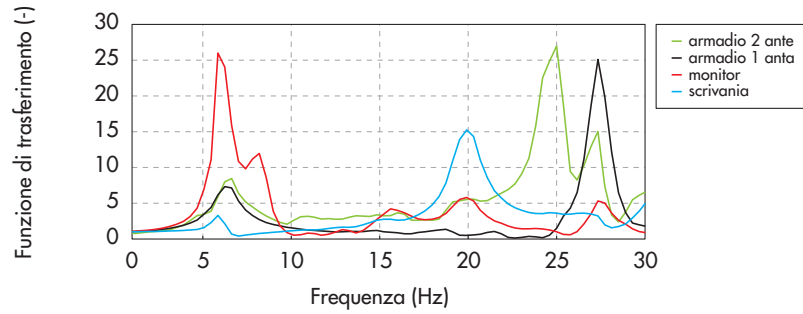


Figura 7
Accelerogramma in accordo con la normativa AC156.

Figura 8
Curva di trasferimento test
ID6.



gramma è rappresentativo di una storia temporale di piano. Essa ha un elevato contenuto in frequenza in modo da eccitare tutti i componenti non strutturali con periodo T appartenente all'intervallo (1/35.5; 1/1.3 sec).

Volendo consentire un confronto tra le accelerazioni riportate in Figura 7 e quelle registrate durante il sisma che ha avuto epicentro a Northridge nel 1994 nell'ospedale Olive View-UCLA Medical Center di Sylmar (California), si riportano nel seguito le accelerazioni di piano registrate in tale struttura: 0.383 g al piano terra, 1.027 g al terzo piano, 1.092 g al quarto piano e 1.498 g al sesto piano. L'ospedale è infatti monitorato a partire dalla sua ricostruzione in seguito al crollo avvenuto durante il terremoto del 1971.

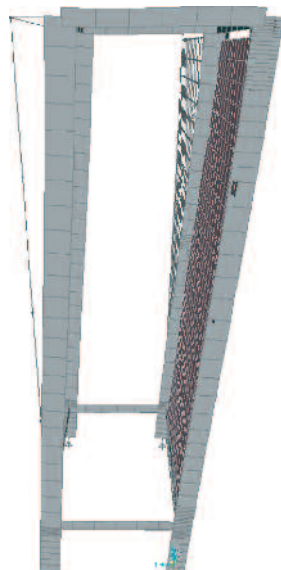
Infine, per monitorare la risposta dei contenuti della stanza ospedaliera vengono utilizzati accelerometri digitali di alta qualità. Dai risultati delle prove eseguite sui componenti ospedalieri, per l'identificazione dinamica, è emerso che l'armadio a due ante, l'armadio ad una anta e

la scrivania presentano picchi nella curva di trasferimento che consentono di definire la frequenza propria degli elementi stessi. Si riporta nella Figura 8 una delle curve ottenute.

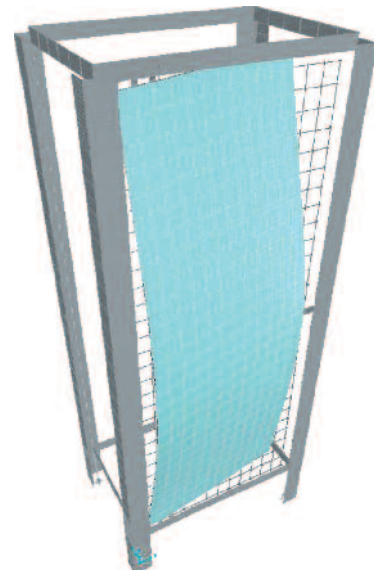
Si evince che la definizione della frequenza del monitor è immediata, visto che la medesima curva presenta un solo picco, mentre non si può dire la stessa cosa per gli armadi e per la scrivania. Infatti, questi ultimi presentano un picco al di sotto dei 10 Hz ed uno dopo i 20 Hz, rendendo non immediata la definizione della frequenza naturale del rispettivo componente. Tuttavia, osservando i risultati delle prove, si è ipotizzato che la frequenza propria degli stessi fosse quella intorno ai 6 Hz, mentre il picco successivo fosse relativo alla frequenza di vibrazione del vetro.

Con lo scopo di determinare in maniera certa il picco di interesse, è stata eseguita la modellazione degli armadi e della scrivania al SAP2000. Gli armadi sono stati modellati mediante una rappresentazione tridimensionale nel modo più

Figura 9.
Forme modali armadio ad un'anta.



a) Modo di vibrazione in direzione trasversale
 $T = 0.135$ sec. $f = 7.38$ Hz



b) Modo di vibrazione locale della vetrina
 $T = 0.043$ sec. $f = 23.12$ Hz

realistico possibile, considerando sia la loro struttura che il vetro. In Figura 9 si riportano le forme modali più interessanti dell'armadio ad un'anta. Dall'analisi dei modi di vibrare di questo armadio, è possibile confermare che il primo picco nella curva di trasferimento è relativo ad un modo di vibrare che coinvolge l'intero armadio; il secondo picco, evidenziato per una frequenza tra i 20 e 30 Hz, è relativo, invece, al modo di vibrare che coinvolge la sola vetrina (IV modo di vibrare in Figura 9).

Valutazione della richiesta su componenti non strutturali secondo le NTC2008 e l'Eurocodice 8. Le NTC2008 e l'EC8 (CEN, 2004) prevedono che i componenti non strutturali sensibili alle accelerazioni siano progettati nei confronti di una forza sismica, proporzionale al proprio peso, applicata nel baricentro (Figura 10). Tali norme infatti suggeriscono che la determinazione degli effetti dell'azione sismica sugli elementi non strutturali possa essere effettuata applicando agli elementi

stessi una forza orizzontale F_a :

$$F_a = (S_a W_a)/q_a \quad (1)$$

dove

- F_a è la forza sismica orizzontale agente al centro di massa dell'elemento non strutturale nella direzione più sfavorevole;
- W_a è il peso dell'elemento;
- S_a è l'accelerazione massima, adimensionata rispetto a quella di gravità, che l'elemento strutturale subisce durante il sisma e corrisponde allo stato limite in esame
- q_a è il fattore di struttura dell'elemento, variabile tra 1 e 2, in funzione della natura del componente analizzato.

S_a può essere calcolata nel seguente modo:

$$S_a = \alpha \cdot S \cdot \left[\frac{3 \cdot (1 + z/H)}{1 + (1 - T_a/T_1)^2} - 0.5 \right] \quad (2)$$

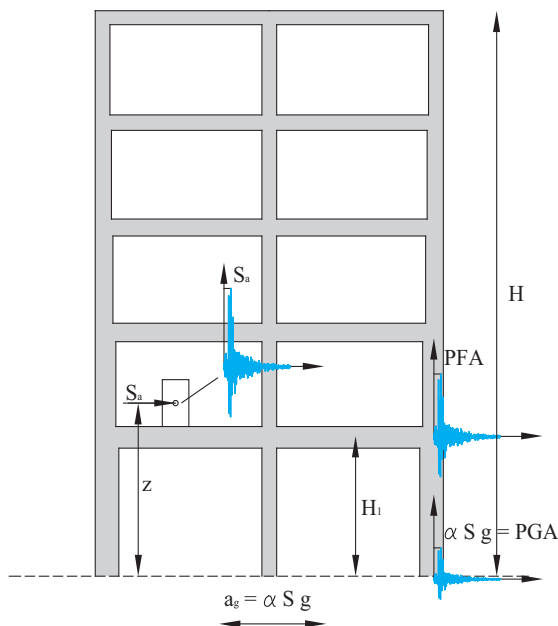


Figura 10
Schema esemplificativo della valutazione della richiesta sismica sui componenti non strutturali in accordo alle NTC 2008.

dove:

- α è il rapporto tra l'accelerazione massima del terreno a_g su sottosuolo tipo A da considerare nello stato limite in esame e l'accelerazione di gravità g ;
- S è il coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche, valore variabile tra 0.9 e 2.52;
- T_a è il periodo fondamentale di vibrazione dell'elemento non strutturale;
- T_1 è il periodo fondamentale di vibrazione della costruzione nella direzione considerata;

- Z è la quota del baricentro dell'elemento non strutturale misurata a partire dal piano di fondazione;
- H è l'altezza della costruzione misurata a partire dal piano di fondazione.

L'assunzione normativa di modellare la richiesta sismica sui componenti non strutturali con una forza concentrata nel baricentro degli stessi risulta essere molto semplificata e richiede in taluni casi degli approfondimenti specifici. Tale prescrizione, infatti, è rigorosa qualora la distribuzione delle accelerazioni sul componente sia

uniforme. Tuttavia, la distribuzione di accelerazioni di componenti non strutturali, quali armadi, non è costante con l'altezza. Obiettivo del presente lavoro è la verifica delle distribuzioni di accelerazioni proposte dalla normativa, a partire dai risultati delle prove su tavola vibrante descritte nella Sezione 2.

4. Evidenze sperimentali e confronto normativo

Per analizzare la distribuzione di accelerazioni prevista dalla normativa italiana ed europea vengono considerate le accelerazioni orizzontali registrate sugli armadietti, a quattro quote differenti, nel corso delle prove descritte. Nel seguito

ci si riferirà ai risultati dell'armadio ad un'anta. In Figura 11 è illustrata la disposizione degli accelerometri sull'armadietto durante le prove. Si selezionano ed analizzano i risultati di prove in cui non si evidenziano fenomeni di rocking e/o martellamento; infatti, in presenza di tali fenomeni, gli accelerogrammi presentano degli impulsi che rendono l'analisi più complessa. In Figura 12 si riportano gli accelerogrammi registrati durante la prova 103 alla base dell'armadio ad un'anta e lungo l'altezza dello stesso. Dall'esame dei segnali registrati emerge che, all'aumentare dell'altezza, l'accelerazione massima aumenta. Inoltre, è interessante notare come il componente stesso funge da filtro per le storie temporali in accelerazione: gli accelerogrammi regi-

Figura 11
Distribuzione delle accelerazioni nelle prove in cui non avviene né ribaltamento né rocking.

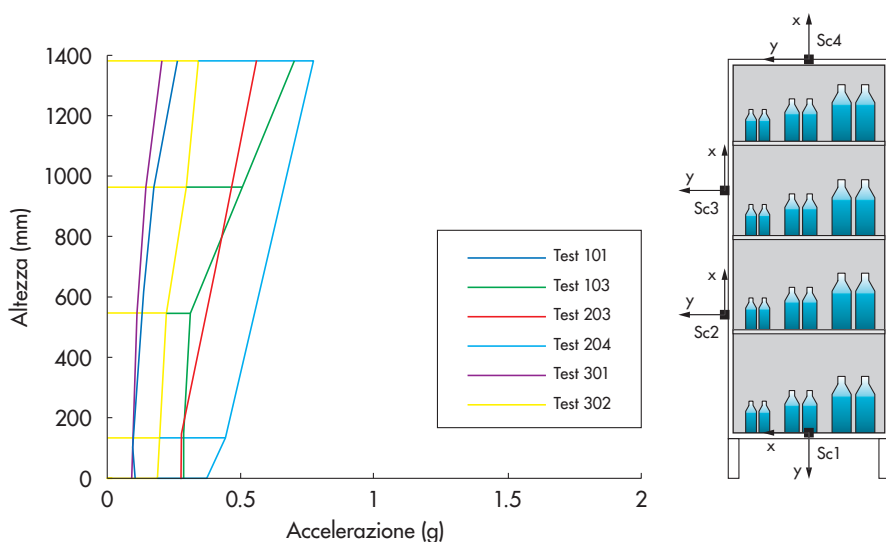
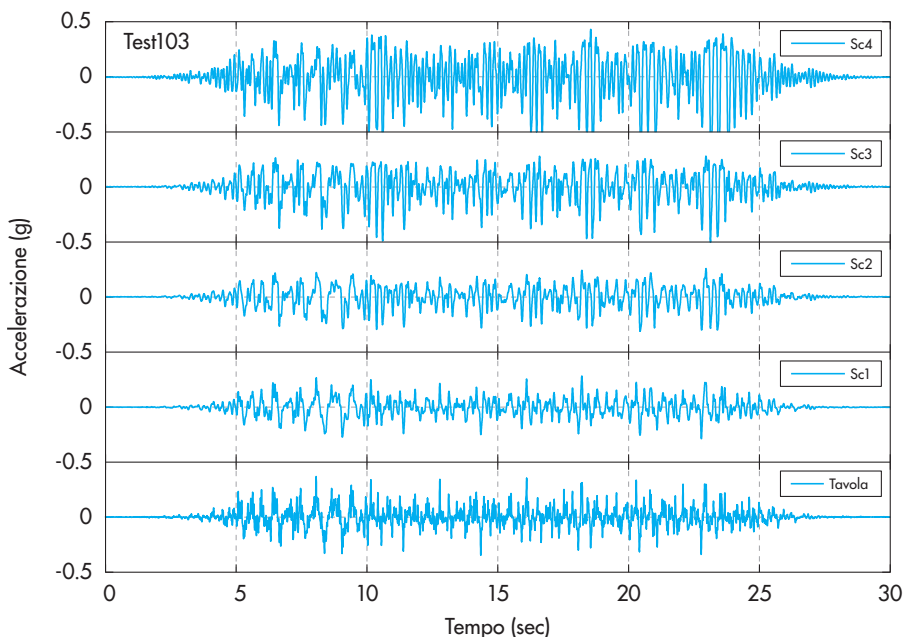


Figura 12
Accelerogrammi registrati durante il test 103.



strati lungo lo sviluppo verticale dello stesso presentano un alto contenuto in frequenza per frequenze vicine alle frequenze naturali del sistema. In Figura 11 viene riportata la distribuzione delle accelerazioni con l'altezza per le prove selezionate; tale distribuzione risulta affine al primo modo di vibrare dell'armadio.

Volendo effettuare un confronto con i limiti di normativa per gli elementi non strutturali, vengono normalizzati i risultati a partire dall'accelerazione di piano (PFA), ossia la massima accelerazione alla base degli armadi. In Figura 13 sono rappresentate le accelerazioni registrate sull'armadio normalizzate rispetto alla PFA, per ogni prova e la media di queste. Tali diagrammi vengono confrontati con la distribuzione di accelerazioni orizzontali di piano in edifici, previste sia dall'ASCE 7 che dalle NTC2008. Le norme ASCE 7 prevedono un'accelerazione linearmente distribuita che parte dal valore di PGA al livello più basso per arrivare

ad un valore triplo in testa; le norme NTC2008 utilizzano lo stesso criterio ma limitano il valore di accelerazione in testa a 2.5 PGA.

In Figura 14 è, invece, confrontata la distribuzione di accelerazioni sull'armadio ottenuta durante la prova con l'accelerazione computata sul componente non strutturale in accordo alle NTC2008 e all'EC8 (Sezione 3). Infatti, la prescrizione di applicare la forza F_a "al centro di massa dell'elemento non strutturale nella direzione più sfavorevole" è implicitamente legata ad un'assunzione di accelerazioni uniformi lungo l'altezza del componente.

I risultati sperimentali ottenuti dimostrano che l'accelerazione è distribuita come in Figura 13, pertanto si potrebbe assumere la distribuzione suggerita dalle NTC2008 per valutare la distribuzione delle accelerazioni di piano, anche per valutare la distribuzione di accelerazioni su elementi non strutturali con sviluppo in altezza quali armadi non vincolati in testa. Tale assun-

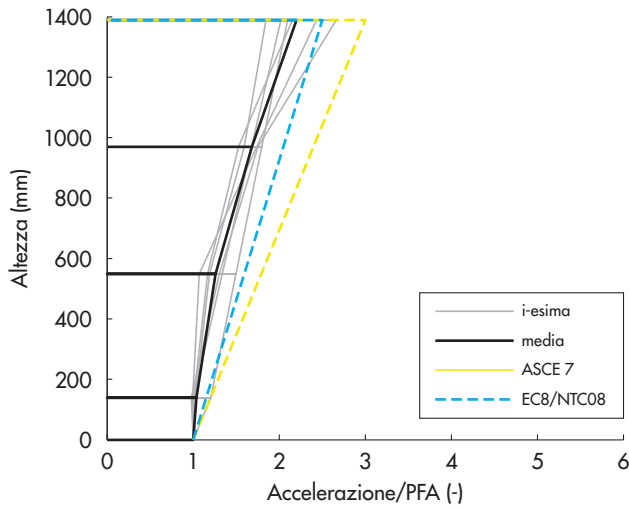


Figura 13
Distribuzione di accelerazioni in altezza normalizzate rispetto alla PFA, comprensive di valor medio e limiti di normativa.

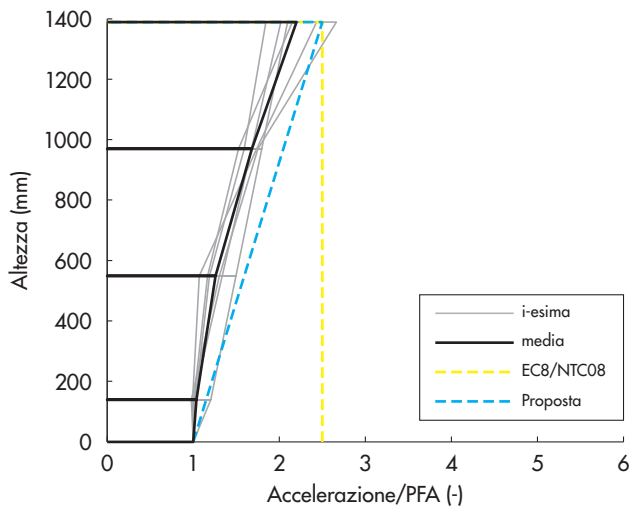


Figura 14
Confronto tra la distribuzione attualmente considerata dalla NTC2008 e la distribuzione proposta, ottenuta nelle prove.

zione risulta equivalente a considerare il componente non strutturale del tipo "armadio" come una struttura oscillante sul generico piano dell'edificio di appartenenza.

È evidente che la forza risultante dalla distribuzione di accelerazioni delle norme è cautelativa per quanto riguarda le configurazioni esaminate in questo lavoro. Il momento ribaltante prodotto da tale distribuzione è maggiore del 20% rispetto a quello che si ottiene dalla distribuzione proposta (linea punteggiata), mentre il taglio è maggiore del 30%. Quindi, valutando le sollecitazioni nella maniera proposta si affievolirebbe il risultato senza complicanze di calcolo e con un risparmio non trascurabile in termini di sollecitazioni di calcolo.

5. Conclusioni

I rilievi eseguiti sugli edifici ospedalieri a seguito dei recenti terremoti hanno mostrato le forti carenze che questi presentano rispetto alle prestazioni richieste. All'importanza della funzione di assistenza dei pazienti si contrappone la vulnerabilità degli edifici ospedalieri, imputabile all'elevata complessità che li caratterizza, all'elevata esposizione dovuta all'affollamento, ai contenuti tecnologici e potenzialmente molto pericolosi. Pertanto, molto importante, è l'operatività post-terremoto di strutture strategiche come l'ospedale. Tale operatività dipende fondamentalmente dal danneggiamento di parti strutturali e non strutturali. Mentre fino a pochi anni or sono l'attenzione era concentrata solo sui componenti strutturali, oggi, l'attenzione è principalmente concentrata su quelli non strutturali, in quanto si è visto, soprattutto negli ultimi terremoti, che i danni riguardano principalmente tali componenti. Quanto detto è legato anche ad un problema di natura economica, basti pensare che per gli ospedali il costo degli elementi non strutturali è circa l'80-90% del costo totale dell'edificio. Ciò si deve all'elevato costo delle apparecchiature mediche.

Presso il Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura dell'Università di Napoli Federico II sono state recentemente eseguite delle prove dinamiche su tavola vibrante su una sottostruttura costituita da una stanza ambulatoriale,

al fine di analizzare il comportamento sismico di alcuni elementi nonché dei contenuti di una struttura ospedaliera. Si è scelto di testare una tipica stanza ambulatoriale concentrando l'attenzione sui seguenti componenti: due armadi con differenti snellezze, una scrivania, un monitor/case e diversi contenuti in vetro. Sono state condotte prove con diversa disposizione in pianta, in modo da poter esaminare il comportamento dinamico dei componenti considerati, sia nel caso in cui fossero investiti ortogonalmente che longitudinalmente dall'input sismico definito dall'accelerogramma definito in accordo alla norma AC156. I risultati ottenuti dall'elaborazione dei segnali registrati dagli accelerometri durante l'esecuzione delle prove, relativi alla fase di identificazione dinamica, consentono una valutazione completa del comportamento dinamico degli elementi testati.

L'elaborazione dei dati sperimentali evidenzia che la distribuzione di accelerazione sul componente non strutturale preso in esame non è uniformemente distribuita, come implicitamente previsto dalle NTC2008. Le accelerazioni orizzontali registrate su un armadio sottoposto a prova esibiscono una distribuzione crescente con l'altezza, il cui valore massimo corrisponde con il valore medio della distribuzione uniforme prevista dalla normativa. Per questo motivo, si propone una diversa distribuzione di accelerazioni orizzontali da introdurre in normativa, limitatamente ai componenti della stessa tipologia di quelli testati in questo lavoro. In particolare si consiglia di indagare il componente non strutturale del tipo "armadio" come una struttura oscillante sul generico piano dell'edificio di appartenenza.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato finanziato dal Dipartimento di Protezione Civile nell'ambito del progetto di ricerca ReLUIS-DPC 2010-2013, Linea 2.2 (Sistemi Speciali), Sub-task 2.2.2. Strutture ospedaliere. Gli autori ringraziano Fabio Gustuti e Claudio Russo, laureandi in Ingegneria Strutturale e Geotecnica, per il contributo fornito nella elaborazione dei risultati sperimentali. Le attività sperimentali sono state curate anche dagli ingg. Giacomo Porcelli e Jonatan Picariello.

Bibliografia

- American Society of Civil Engineers (2010) - ASCE/SEI 7-10: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, Reston, Virginia, US.
- Burc N. 02 dell'11 Gennaio 2002 (2002) - Deliberazione N. 7301 Area Generale Di Coordinamento Sviluppo Piano Sanitario Assistenza Sanitaria, Regione Campania.
- Casarotti C., Pavese A., Peloso S. (2009) - Risposta

sismica del complesso ospedaliero San Salvatore de L'Aquila in occasione del terremoto del 6 aprile 2009, Progettazione Sismica 3.

- CEN (2004) - Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance - Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. EN 1998-1, Brussels, Belgium.

- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (2008) - Decreto Ministeriale del 14/01/2008, Approva-

- zione delle nuove norme tecniche per le costruzioni, G.U. n. 29 del 4/2/2008 (in Italian).
- Cosenza E., Di Sarno L., Maddaloni G., Magliulo G., Petrone C., Protà A. (2014) - Shake table tests for the seismic fragility evaluation of hospital rooms, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (submitted for publication).
- CSI Computer & Structures Inc. (2004) - SAP2000. Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis of Three-Dimensional Structures, Computer & Structures, Inc., Berkeley, California.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2007) - Interim protocols for determining seismic performance characteristics of structural and non-structural components through laboratory testing. Report No. FEMA 461, Washington DC, US.
- International Code Council (ICC) (2000) - International Building Code, 2000 Edition (IBC 2000), Falls Church, Virginia, USA. .
- International Conference of Building Officials (ICBO) (2000) - AC 156 Acceptance Criteria for the Seismic Qualification of Nonstructural Components, ICBO Evaluation Service, Inc., Whittier, California, USA.
- Kuo K.C., Suzuki Y., Katsuragi S., Yao G.C. (2011) - Shake table tests on clutter levels of typical medicine shelves and contents subjected to earthquakes, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 40(12): 1367-1386.
- Magliulo G., Pentangelo V., Maddaloni G., Capozzi V., Petrone C., Lopez P., Talamonti R., Manfredi G. (2012a) - Shake table tests for seismic assessment of suspended continuous ceilings, *Bulletin of Earthquake Engineering* 10(6): 1819-1832.
- Magliulo G., Petrone C., Capozzi V., Maddaloni G., Lopez P., Manfredi G. (2014) - Seismic performance evaluation of plasterboard partitions via shake table tests, *Bulletin of Earthquake Engineering*: (online first).
- Magliulo G., Petrone C., Capozzi V., Maddaloni G., Lopez P., Talamonti R., Manfredi G. (2012b) - Shake Table Tests on Infill Plasterboard Partitions, *The Open Construction and Building Technology Journal* 6 (Suppl 1-M10): 155-163.
- Miranda E., Mosqueda G., Retamales R., Pekcan G. (2012) - Performance of Nonstructural Components during the 27 February 2010 Chile Earthquake, *Earthquake Spectra* 28: S453-S471.
- Taghavi S., Miranda E. (2003) - Response assessment of nonstructural building elements, PEER report 2003/05, College of Engineering, University of California Berkeley, USA.
- Yavari S., Chang S.E., Elwood K.J. (2010) - Modeling Post-Earthquake Functionality of Regional Health Care Facilities, *Earthquake Spectra* 26(3): 869-892.