

Terremoto dell'Emilia - danni ad edifici produttivi a struttura prefabbricata

Emilia earthquake - damage to buildings in manufacturing prefabricated structure

Marco Savoia¹, Claudio Mazzotti², Nicola Buratti³, Barbara Ferracuti⁴, Marco Bovo⁵, Veronica Ligabue⁶, Loris Vincenzi⁷ ■

Sommario

La presente memoria descrive i danni ed i crolli osservati in edifici industriali prefabbricati dopo il terremoto dell'Emilia. Questo tipo di costruzioni, non progettato con criteri antisismici, si è rivelato particolarmente vulnerabile per diverse ragioni, come ad esempio l'assenza di sistemi di collegamento tra i vari elementi prefabbricati, l'inadeguatezza dei sistemi di collegamento tra pannelli prefabbricati esterni ed elementi portanti (pilastri e travi), l'interazione tra tamponamenti e pilastri ed, in alcuni casi, l'insufficienza delle fondazioni.

Abstract

The present paper describes the collapses in precast industrial buildings caused by the 2012 Emilia earthquake. This kind of buildings, not designed with seismic criteria, was found being very vulnerable for several reasons, mainly the absence of connecting systems between the various precast monolithic elements, the inadequacy of connection systems of external precast walls to the bearing elements (columns and beams), the interaction between non-structural walls and structural elements, and the inadequacy of the foundations.

1. Introduzione

Nel maggio 2012 la regione Emilia è stata colpita da due forti eventi sismici, caratterizzati da un analogo rilascio di energia: la prima scossa, con magnitudo locale, $M_L = 5.9$, e magnitudo momento, $M_w = 6.11$, è avvenuta il 20 maggio con epicentro in prossimità di Mirandola (MO) e di Finale Emilia (MO), e la seconda ($M_L = 5.8$, $M_w = 5.96$) il 29 maggio, con epicentro in prossimità di Medolla (MO). Le massime accelerazioni orizzontali registrate durante questi due eventi sono state rispettivamente $PGA_h = 303,30 \text{ cm/s}^2$ (ad una distanza dall'epicentro di 13,4 km) e $PGA_h = 240 \text{ cm/s}^2$ (ad una distanza di 16.0 km). Nelle zone epicentrali sono state inoltre registrate accelerazioni massime verticali fino a 900 cm/s^2 (Dolce *et al.*, 2012a,b). In aggiunta a questo la risposta sismica locale è spesso stata caratterizzata da fenomeni di amplificazione delle ordinate spettrali per periodi medio-lunghi, che sono tipici delle strutture prefabbricate (Priolo *et al.*, 2012).

La zona interessata dai terremoti non era storicamente considerata come sismica nonostante nel passato fosse stata interessata da alcuni terremoti intensi, come quello di Ferrara del 1570-1574 (Castelli *et al.*, 2012). Solo nel 2001, l'aggiornamento della mappa di pericolosità sismica ha definito la zona come a medio-bassa sismicità (Lucantoni *et al.*, 2001). Tale mappa è stata accolta in forma definitiva, rendendone cogente l'utilizzo, solo nel 2005, con il pronunciamento della Giunta Regionale PROGR n. 1677/2005. Per questi motivi, la quasi totalità degli edifici prefabbricati interessati dal sisma era stata progettata senza considerare alcuna regola di tipo antisismico.

La scossa principale del 20 maggio ha causato il crollo di numerosi edifici prefabbricati nelle aree industriali di S. Agostino, Bondeno, Finale Emilia e S. Felice sul Panaro. Il sisma del 29 maggio è stato invece particolarmente gravoso per gli edifici produttivi situati a Mirandola, Cavezzo e Medolla. Le prime stime indicano che in alcune aree industriali, circa il 70% degli edi-

¹ DICAM - Università di Bologna - ✉ marco.savoia@unibo.it

² DICAM - Università di Bologna - ✉ claudio.mazzotti@unibo.it

³ DICAM - Università di Bologna - ✉ nicola.buratti@unibo.it

⁴ DICAM - Università di Bologna - ✉ barbara.ferracuti@unibo.it

⁵ DICAM - Università di Bologna - ✉ marco.bovo@unibo.it

⁶ DICAM - Università di Bologna - ✉ veronica.ligabue2@unibo.it

⁷ DIEF - Università di Modena e Reggio Emilia - ✉ loris.vincenzi@unimore.it

fici prefabbricati sono crollati o sono stati severamente danneggiati.

Criticità e crolli connessi a edifici prefabbricati erano stati osservati anche a seguito di terremoti passati e sono documentati in letteratura; si vedano ad esempio Ghosh e Cleland, 2012; Iverson e Hawkins, 1994; Khare *et al.*, 2011; Muguruma *et al.*, 1995; Posada e Wood, 2002; e Toniolo e Colombo, 2012. Tuttavia, la gravità dei crolli avvenuti nell'edilizia prefabbricata con il sisma dell'Emilia non ha precedenti in Italia.

La presente memoria descrive una serie di danni e crolli di strutture prefabbricate osservati dagli autori nel corso dei sopralluoghi svolti nelle zone interessate dal terremoto. I rilievi a S. Felice sul Panaro e S. Agostino sono stati condotti dopo la serie sismica del 20 Maggio, mentre a Mirandola i rilievi sono stati svolti sia prima che dopo la seconda sequenza.

I crolli avvenuti hanno messo in evidenza la vulnerabilità degli edifici prefabbricati non progettati secondo criteri antisismici. La mancanza di connessioni tra le varie parti monolitiche degli edifici è stata la causa principale della maggior parte dei collassi. I grandi spostamenti in sommità che hanno causato la perdita di appoggio delle travi prefabbricate dai pilastri o dei tegoli di copertura in appoggio semplice sulle travi sono stati, in alcuni casi, accentuati anche da altri fenomeni. Ad esempio, in molti casi, l'interazione con elementi non strutturali, in particolare i pannelli di tamponamento, in muratura o prefabbricati, e situazioni di irregolarità in pianta dei fabbricati, hanno avuto spesso effetti negativi e causato crolli parziali.

Inoltre, molti crolli hanno interessato pannelli di tamponamento prefabbricati a causa dell'inadeguatezza dei loro sistemi di ancoraggio sugli elementi di supporto.

Alcuni crolli anche molto estesi, sono con buona probabilità correlati dall'inadeguatezza delle fondazioni, non progettate nei riguardi delle azioni orizzontali derivanti dal sisma, ma solo per l'azione del vento.

Infine, numerosi crolli sono avvenuti a causa del ribaltamento di scaffalature di magazzini o di magazzini automatizzati, le cui strutture portanti, dimensionate per carichi verticali, non hanno retto alle azioni orizzontali.

La documentazione raccolta, unitamente a quelle di altre unità di ricerca, ha rappresentato il punto di partenza per la stesura delle "Linee di indirizzo per interventi locali e globali su edifici industriali monopiano non progettati con criteri antisismici", redatte dal Gruppo di Lavoro Agibilità Sismica dei Capannoni Industriali del Consorzio Reluis (Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica), e disponibile in rete a partire dalla metà di Giugno 2012 (<http://www.reluis.it>)

2. Prescrizioni normative per il progetto di strutture in calcestruzzo armato

Le carenze osservate nella risposta sismica delle strutture prefabbricate sono, in generale, derivate da scelte progettuali e dettagli costruttivi non conformi agli attuali criteri di progettazione antisismica. Infatti, non essendo le zone interessate soggette a prescrizioni di tipo antisismico all'epoca della costruzione, gli edifici prefabbricati interessati dal sisma erano stati progettati considerando i soli carichi verticali e, quale azione orizzontale, la sola azione del vento. Tali strutture sono risultate completamente inadeguate a resistere alle azioni orizzontali prodotte dal sisma.

La legge n. 1086 del 5 novembre 1971 che disciplina le opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso e a struttura metallica, nonché, successivamente la legge n. 64 del 2 febbraio 1974 che tratta delle costruzioni ricadenti in zona sismica rappresentano le prime regolamentazioni imposte a livello nazionale. Ad esse sono seguiti una serie di decreti e linee guida, tra i quali i più importanti, con riferimento alle strutture prefabbricate, sono le CNR 10025/98, il D.M. 3/12/1987, il D.M. 14/02/1992, il D.M. 9/1/1996 e il D.M. 16/1/1996. In particolare, il D.M. 16.1.1996 – *Norme Tecniche relative ai criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi* – indicava i criteri per la definizione e la combinazione delle azioni con l'eccezione di quelle sismiche mentre il D.M. 9.1.1996 – *Norme Tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche* – prescriveva i criteri generali di progetto e di verifica per le strutture in zona non sismica. Il D.M. 16.1.1996 – *Norme Tecniche relative alle costruzioni in zona sismica* – forniva le regole di progetto in zona sismica ma era applicato solo nei comuni classificati come sismici, classificazione che non contemplava le municipalità interessate dai terremoti in oggetto. La prima mappa di pericolosità sismica per l'Italia è stata realizzata dopo il terremoto di Messina del 1908. Negli anni seguenti si sono succeduti numerosi aggiornamenti, tipicamente a seguito di terremoti intensi. Un importante aggiornamento delle mappe di pericolosità sismica è avvenuto nel 1996 quando sono state definite quattro diverse tipologie di zone, corrispondenti a differenti livelli di pericolosità sismica. Secondo tale classificazione, l'Emilia era in gran parte definita come ricadente in zona 4, per la quale non dovevano essere applicati i criteri di progettazione per le costruzioni in zona sismica.

La mappa di pericolosità sismica è stata succes-

sivamente aggiornata nel 2001 e nel 2005, mentre la progettazione sismica si è fortemente evoluta nel 2003 e 2005 con l'emanazione delle Ordinanze del Dipartimento della Protezione Civile (OPCM 3274, OPCM 3432), e nel 2008, con la pubblicazione definitiva delle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14.1.2008). La più significativa modifica alle mappe di pericolosità sismica è consistita in una definizione quasi puntuale della accelerazione al suolo, in conseguenza della quale gran parte dell'Emilia risulta classificata a medio-bassa pericolosità sismica. Con riferimento ad un periodo di ritorno di 475 anni, la attuale mappa prevede accelerazioni di picco orizzontali al suolo pari a 0.14 – 0.17 g su terreno rigido e pari a 0.22 – 0.26 g su terreno deformabile (come quello interessato dai recenti eventi).

Per le strutture in calcestruzzo armato in zona non sismica, la geometria e le regole di dettaglio progettuale degli elementi strutturali erano definite principalmente con riferimento ai carichi verticali, permanenti ed accidentali, ed al vento quale unica azione orizzontale. Le normative prescrivevano dimensioni minime per gli elementi e non ponevano limitazioni alla dimensione delle travi in relazione a quelle dei pilastri. Indicavano inoltre valori minimi per le percentuali di armatura per i pilastri modesti se confrontati con quanto prescritto per le zone sismiche. Le connessioni tra le travi e i pilastri erano essenzialmente basate sull'attrito oppure, in rari casi, contemplavano l'uso di connettori metallici previsti unicamente

per facilitare le fasi di montaggio. È interessante notare come le CNR 10025 contenevano regole di progetto per le zone sismiche, alcune delle quali analoghe a quanto prescritto dalle normative attuali, ma nelle zone non sismiche tali regole non erano applicate.

3. Principali tipologie di edifici prefabbricati presenti nelle zone interessate dal sisma

La regione colpita dai terremoti del maggio 2012 è una delle zone più produttive d'Italia. Gran parte degli edifici sede di attività produttive ha un singolo piano ed è realizzata in calcestruzzo armato con struttura isostatica, con travi in semplice appoggio sui pilastri. Come sopra anticipato, le connessioni trave-pilastro erano tipicamente basate sull'attrito senza alcun tipo di collegamento meccanico, solo per le luci più grandi a volte era interposto uno strato di neoprene. La stabilità dell'edificio e la sua resistenza alle azioni orizzontali (vento) erano pertanto basate sul comportamento a mensola delle colonne.

Sebbene certamente semplificativa, è utile ai fini di una comprensione delle tipologie di danni, dividere gli edifici prefabbricati in due gruppi:

- Edifici prefabbricati realizzati negli anni '70 e '80;
- Edifici prefabbricati di più recente costruzione (dopo gli anni '80).

La maggior parte degli edifici realizzati fino agli



Figura 1
Mirandola - Edificio prefabbricato con trave a doppia pendenza e tamponamenti in muratura in luce trave-pilastri (prima della scossa del 29 Maggio).



Figura 2
Mirandola - Edificio prefabbricato con elementi di copertura precompressi e pannelli di chiusura esterni prefabbricati orizzontali.

Figura 3
Mirandola - Edificio prefabbricato con pannelli di chiusura esterna prefabbricati verticali (stesso fabbricato di Figura 11).

anni '80 hanno travi prefabbricate con luci di 12-20 m ed un interasse tra i portali, nella direzione longitudinale dell'edificio, di 6-10 m (Figura 1). Le travi prefabbricate sono a doppia pendenza, ed i pilastri snelli con sezione quadrata di lato 30-40 cm. Non sono presenti connettori tra trave e pilastro. Le travi in genere non presentano efficaci ritegni (forcelle) nei confronti dei movimenti fuori dal piano, specialmente quando sia le travi trasversali sia quelle longitudinali poggiano sulla sommità del pilastro. La maggior parte di questi edifici ha pannelli di tamponamento in muratura in luce trave-pilastro sia in facciata sia in direzione longitudinale.

Gli edifici prefabbricati di più recente costruzione hanno interassi tra i pilastri decisamente superiori (fino a 30 m), e tipicamente travi sagomate con sezione filanti ad I (Figura 2). La copertura è realizzata con elementi precompressi, tipicamente tegole a pi greco, profili alari o microshed. Negli ultimi due casi è molto frequente l'alternanza di elementi portanti con lucernai. In questo caso, abbastanza comune per gli edifici realizzati negli ultimi 15 anni, la copertura è certamente deformabile nel suo piano.

I pannelli di chiusura laterale del capannone, anch'essi prefabbricati, sono collegati ai pilastri della struttura portante in calcestruzzo armato mediante opportuni sistemi di ancoraggio, e sono disposti orizzontalmente o verticalmente (Figure 2 e 3).

4. Analisi dei danni negli edifici industriali prefabbricati anni '70-'80

Gli edifici industriali prefabbricati costruiti negli anni '70 e '80 sono molto flessibili nei confronti

delle azioni orizzontali. Pertanto, la rigidezza nel piano dei pannelli di tamponamento in muratura, realizzati in luce trave-pilastro, risulta decisamente superiore a quella dei pilastri portanti.

In presenza di pannelli di tamponamento regolari in muratura e di coperture sufficientemente rigide nel loro piano da trasmettere ai pannelli le azioni orizzontali, la resistenza di questi ultimi è stata di norma sufficiente ad assorbire, eventualmente con qualche lieve danno, le azioni sismiche orizzontali (Figura 4). In alcuni casi tuttavia, come nell'edificio in Figura 5, la grande deformabilità della copertura è stata con ogni probabilità la causa del collasso, poiché non in grado di trasferire efficacemente le forze orizzontali ai pannelli murari di facciata, che sono invece risultati perfettamente integri.

Al contrario, se i pannelli di tamponamento di facciata in muratura risultavano irregolari, come nel caso di presenza di finestre a nastro sotto trave, l'interazione tra il tamponamento e i pilastri prefabbricati ha spesso causato danni significativi a questi ultimi, che hanno portato in molti casi alla perdita dell'appoggio della trave sul pilastro. Si tratta probabilmente della causa di collasso più frequente nelle aree industriali di San Felice sul Panaro e Mirandola (Figura 6). Tipicamente questo tipo di collasso ha interessato solo i portali di facciata, estendendosi in qualche caso al portale successivo (Figura 6d). È facile verificare infatti come la presenza del pannello di tamponamento abbia infatti reso uno dei due pilastri di facciata decisamente più corto, e quindi più rigido di tutti gli altri, e pertanto abbia assorbito gran parte del taglio orizzontale dell'intero capannone. In tale pilastro, di



Figura 4
S. Felice sul Panaro - Edificio prefabbricato con pannelli in muratura regolari, solo leggermente danneggiato dal terremoto.

Figura 5
Mirandola - Edificio prefabbricato crollato con l'eccezione dei due pannelli in muratura di facciata.



Figura 6
Crolli causati da pannelli di tamponamento in muratura irregolari a causa della presenza di finestre a nastro. Il prefabbricato di Figura 6(c) è quello la cui foto all'interno prima del sisma è riportata in Figura 1.

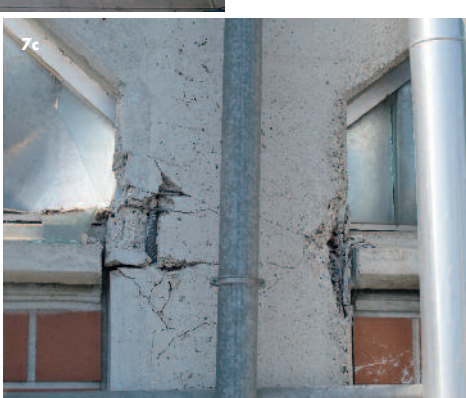
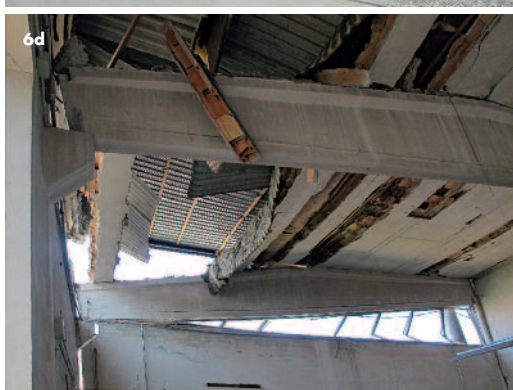


Figura 7
S. Felice sul Panaro e Mirandola: Crisi di pilastro di facciata (a) per taglio o (b, c) per flessione, dovuti all'interazione dei pilastri con tamponamenti irregolari di facciata.

conseguenza, il rapporto tra la forza orizzontale e quella verticale ha superato il valore di forza trasmissibile per mezzo dell'attrito, provocando lo scivolamento della trave dal suo appoggio. Nei casi in cui la perdita di appoggio non è avvenuta, tale fenomeno è stato anche accompagnato dalla crisi per flessione o per taglio del pilastro stesso (Figura 7a, b).

L'interazione tra i portali prefabbricati e gli elementi non strutturali di facciata ha rappresentato la causa anche di altri danni severi e crolli. Ad esempio la Figura 8 mostra un crollo causato dalla interazione del portale di facciata con un pilastro, posizionato in corrispondenza della mezzeria della trave del portale di facciata (sulla sinistra della Figura 8), il cui ruolo era



Figura 8
S. Felice sul Panaro. Crollo della travata esterna a causa della interazione con un pilastro non strutturale di facciata.



Figura 9
Mirandola - Fuori piombo di un pannello in muratura non collegato alla trave superiore in calcestruzzo armato, a causa della presenza di una finestrata a nastro.

quello di sorreggere il pesante portone metallico a sinistra. La trave prefabbricata, progettata chiaramente secondo uno schema di semplice appoggio alle estremità, si è invece di fatto trovata in uno schema iperstatico di trave su tre appoggi e pertanto, durante le forti oscillazioni dovute alle accelerazioni del sisma, la trave ha perso il supporto laterale del pilastro a destra in figura, spezzandosi successivamente in quanto sollecitata secondo uno schema a mensola anziché in semplice appoggio alle estremità. Infine, pannelli di tamponamento irregolari, non collegati alla trave superiore in calcestruzzo armato a causa delle finestre a nastro, sono spesso stati oggetto di crolli oppure sono risultati significativamente danneggiati dal sisma (Figura 6b e Figura 9).

5. Analisi dei danni in edifici prefabbricati più recenti

I meccanismi di collasso osservati negli edifici prefabbricati di più recente costruzione sono più vari e complessi, e certamente meritano un'analisi approfondita le cause di alcuni crolli davvero eclatanti (Figura 10a, b).

In molti casi, sono stati osservati collassi parziali dovuti alla caduta di elementi di copertura non collegati alle travi prefabbricate, anche senza che fossero evidenti danni ai pilastri. Specialmente nel caso di coperture realizzate con elementi prefabbricati alternati a lucernari, gli elevati spostamenti alla sommità dei pilastri, anche differenziali, e la deformabilità del piano della copertura hanno causato la perdita dell'appoggio degli elementi prefabbricati (Figura 11).

La caduta degli elementi di copertura è spesso

localizzata in corrispondenza di irregolarità in pianta dei prefabbricati, quali ad esempio la variazione del numero di campate (vedi Figura 12a ed il prefabbricato di sinistra in Figura 12b). In molti casi, il crollo ha interessato le campate di estremità (vedi prefabbricato di destra in Figura 12c), i cui telai di appoggio avendo masse di competenza differenti, sono state soggette a spostamenti differenziali che hanno causato la perdita di appoggio. In altri casi, invece, il crollo ha interessato porzioni centrali del fabbricato (ad esempio la costruzioni di destra di Figura 12b), a causa presumibilmente di una oscillazione in opposizione di fase delle campate adiacenti.

Nel caso dell'edificio pluripiano ad uso terziario di Figura 13, la perdita di appoggio della copertura prefabbricata è stata causata dall'irregolarità dell'edificio; la maggior rigidità della parte destra dell'edificio ha indotto il trasferimento di elevate forze orizzontali che hanno superato la forza trasferibile per attrito sugli appoggi delle travi in corrispondenza della variazione di larghezza dell'edificio.

Molti crolli sono invece correlati chiaramente alla crisi per flessione di alcuni pilastri interni, ed in questi casi sono state coinvolte nel crollo estese porzioni del fabbricato. Un caso emblematico è documentato in Figura 14. Già nel corso della scossa del 20 maggio 2012, un danneggiamento significativo aveva interessato alla base alcuni pilastri intermedi, tant'è che il giorno del crollo avvenuto durante la scossa del 29 Maggio, documentato nelle fotografie, era presente sul posto una squadra di intervento, fortunatamente all'esterno del fabbricato. Un esame approfondito documenta chiaramente come la struttura, dimen-



Figura 10
Crollo di un edificio prefabbricato di recente costruzione.



Figura 11
Mirandola - Caduta di elementi prefabbricati di copertura per perdita di appoggio, senza alcun danno evidenti nei pilastri verticali.

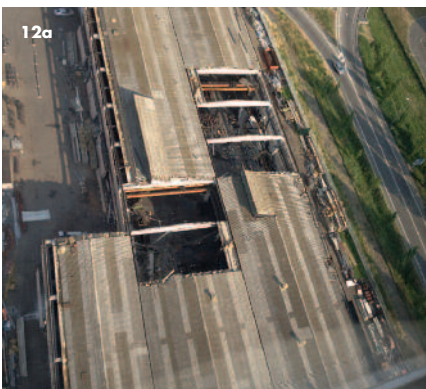


Figura 12
Crolli di elementi prefabbricati di copertura localizzati sovente in corrispondenza di irregolarità in pianta dei fabbricati.



Figura 13
Mirandola - Caduta di elementi di copertura prefabbricati per perdita di appoggio, correlata anche alla irregolarità in pianta dell'edificio.

Figura 14
Crollo completo di un
edificio industriale, con crisi
dei pilastri centrali.



Figura 15
S. Agostino e Mirandola -
Crolli completi di edifici
industriali, con evidenti
rotazioni alla base dei
pilastri.



sionata nei riguardi dei carichi verticali e del vento quale unica azione orizzontale, sia risultata particolarmente vulnerabile all'azione sismica. Presumibilmente, infatti, i pilastri intermedi presentavano armature longitudinali, e pertanto momenti ultimi, significativamente inferiori rispetto ai pilastri esterni, essendo i primi progettati per i soli carichi verticali, e i secondi invece per sostenere anche l'azione orizzontale del vento. A causa della deformabilità della copertura nel proprio piano, per l'alternanza di elementi di copertura e di lucernari, la forza orizzontale nei pilastri centrali è risultata al contrario circa doppia rispetto a quella sui pilastri esterni. Avendo questi ultimi maggiore resistenza ad azioni orizzontali rispetto a quelli interni, e risultando per di più irrigiditi dai pannelli di tamponamento verticali, nessun danno era visibile dall'esterno (Figura 14a).

Alcuni collassi completi di edifici industriali sono imputabili ad una rotazione alla base dei pilastri prefabbricati. Anche se una chiara ed univoca individuazione delle cause richiederebbe informazioni non a disposizione degli autori, la completa assenza di fessurazioni lungo i pilastri suggerisce, come causa più probabile, una rotazione rigida avvenuta in fondazione (Figura 15). Tale conclusione è supportata dall'uso diffuso, dopo gli anni '90, di plinti a bicchiere prefabbricati, semplicemente appoggiati su più ampie fondazioni realizzate in opera. In assenza di azioni sismiche di progetto, la veri-

fica di tali plinti era condotta nei riguardi del ribaltamento, con riferimento alla sola azione del vento (instabilizzante) ed ai carichi verticali (azione stabilizzante). Inoltre, essendo le sezioni trasversali dei pilastri tipicamente ampie per ridurre gli spostamenti sotto l'azione del vento, la sovrastruttura è rimasta in campo elastico, ed il momento flettente trasmesso in fondazione ha ampiamente superato il momento di ribaltamento dei plinti prefabbricati, producendo ampie rotazioni permanenti alla base.

In alcuni edifici prefabbricati i cui pilastri di facciata sono risultati leggermente fuori piombo dopo il sisma, ma senza pervenire al crollo, sono state osservate fessurazioni nelle pavimentazioni a 45° gradi a partire dagli spigoli dei pilastri suddetti, segno evidente di una incipiente rotazione alla base.

6. Analisi dei danni su pannelli di tamponamento prefabbricati

Molti pannelli di tamponamento sono stati oggetto di distacchi, ed in particolare i pannelli disposti in orizzontale (Figura 16). L'analisi visiva ha mostrato una sistematica carenza di resistenza dei connettori per il sostegno dei pannelli, progettati per sostenere le azioni perpendicolari al piano dei pannelli (ad esempio a causa della azione del vento), ma non adeguati a consentire gli spostamenti orizzontali relativi tra connettori ed appoggio inferiore nel piano



Figura 16
Caduta di pannelli di tamponamento prefabbricati disposti in orizzontale.



Figura 17
a, b. Danneggiamento di profili canale aperti durante il sisma e che hanno lasciato uscire il bullone che sorreggeva i pannelli prefabbricati.

dei pannelli stessi a causa delle oscillazioni dei pilastri. Tali connettori (detti profili canale) sono infatti spesso risultati danneggiati a causa degli spostamenti orizzontali, aprendosi e consentendo quindi l'uscita del bullone di ritegno del pannello (Figura 17 a, b).

Tale problema è stato particolarmente gravoso negli elementi di tamponamento nella parte superiore dei fabbricati, ove gli spostamenti dei pilastri erano superiori.

Il comportamento dei pannelli disposti in verticale è stato in generale migliore. In particolare, i pannelli incastrati nella trave di fondazione o

annegati nella pavimentazione hanno aumentato la rigidità e la resistenza dell'edificio, prevenendo la rotazione o il danneggiamento dei pilastri di facciata (Figura 3). Sono invece stati rilevati collassi di pannelli verticali non incastrati in fondazione e con struttura a sandwich (Figura 18).

La Figura 19 mostra infine la caduta dei pannelli di tamponamento orizzontali di un edificio industriale, correlata anche alla rotazione laterale delle travi a supporto degli elementi di copertura, travi che non presentavano alcuna forcella a ritegno di tale movimento.



Figura 18
Caduta di pannelli sandwich di tamponamento verticali non vincolati alla fondazione.

Figura 19
(a) Caduta dei pannelli di tamponamento e (b) dettaglio della rotazione laterale delle travi che sorreggono la copertura. Nella seconda immagine, in basso, si nota anche l'inefficienza dei sistemi di connessione (profili canale) dei pannelli ai pilastri.



7. Danni per la perdita di stabilità del contenuto in magazzini e depositi di stoccaggio

Sono infine documentati numerosi danneggiamenti di magazzini automatici e di depositi di beni materiali, non certamente dimensionati per sopportare azioni orizzontali causate dal sisma. Le grandi masse, poste tipicamente ai livelli superiori nei magazzini automatici, e la presenza di una forzante che per le caratteristiche del terreno ha messo in risonanza strutture con periodo proprio nell'intorno del secondo, hanno causato ingenti danni economici ai contenuti, ed in alcuni casi anche il crollo completo del magazzino (vedi Figura 20 a, b). Nel primo caso è più che evidente la carenza di sistemi di controventamento delle spalliere fuori dal loro piano. Si noti che il peso del materiale contenuto era oltre quattro volte superiore a quello del capannone stesso, ed il valore economico presumibilmente oltre venti volte superiore.

Figura 20
(a) Crollo di un magazzino di stagionatura di formaggi nel mantovano, (b) crollo del magazzino automatico contenente pallet di ceramica a S. Agostino.

8. Conclusioni

La presente memoria ha analizzato diversi crolli osservati a seguito dei terremoti che hanno colpito l'Emilia nel maggio 2012. Le cause princi-

pali dei crolli sono da imputare alla mancata applicazione di regole di progetto antisismico, conseguente alla carenza di una classificazione sismica nella zona sino al 2005.

Le principali modalità di collasso, così come documentate subito dopo il sisma nei report redatti da gruppi di studio di Reluis e nelle "Linee di indirizzo per interventi locali e globali su edifici industriali monopiano non progettati con criteri antisismici", redatte dal Gruppo di Lavoro Agibilità Sismica dei Capannoni Industriali del Consorzio, sono classificabili nel modo seguente:

- Perdita di appoggio degli elementi di copertura dalle travi principali;
 - Perdita di appoggio delle travi principali dai pilastri;
 - Perdita di stabilità laterale di travi senza adeguati ritegni laterali;
 - Collasso dei connettori dei pannelli di facciata;
 - Danni per la perdita di stabilità del contenuto.
- In molti casi i seguenti fattori hanno inoltre contribuito ai sopraccitati crolli:
- L'interazione con pannelli di tamponamento in muratura irregolari;
 - La crisi di pilastri centrali con formazione di cerniere plastiche alla base;



- La mancanza di un comportamento di piano rigido in grado di distribuire le azioni agli elementi con maggiore resistenza;
- La rotazione delle fondazioni, specialmente nel caso di plinti a bicchiere non ancorati alle fondazioni gettate in opera.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare per il sup-

porto economico il Progetto ReLUIIS 2010-13, finanziato dal Dipartimento di Protezione Civile, e gli ingegneri del Centro Interdipartimentale di Ricerca Industriale - Edilizia e Costruzioni (CIRI-EC, www.edilizia-costruzioni.unibo.it) dell'Università degli Studi di Bologna che hanno preso parte ai sopralluoghi: Lorenzo Bacci, Alessandro Bellini, Francesco Carrea, Luca Minnai, Valentina Rinaldini e Anna Rosa Tilocca.

Bibliografia

- Castelli V., Bernardini F., Camassi R., Caracciolo C.H., Ercolani E., Postpischl E. (2012) - Looking for missing earthquake traces in the Ferrara-Modena plain: an update on historical seismicity", *Annals of Geophysics*, 55:4, 519-524.
- Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) (1984) - Istruzioni per il progetto, l'esecuzione e il controllo delle strutture prefabbricate in conglomerate cementizio e per le strutture costruite con sistemi industrializzati - CNR 10025.
- Dolce M., Nicoletti M., Ammirati A., Bianconi R., Filippi L., Gorini A., Marcucci S., Palma F., Zambonelli E., Lavecchia G., De Nardis R., Brozzetti F., Boncio P., Cirillo D., Romano A., Costa G., Gallo A., Tiberi L., Zoppè G., Suhadolc P., Ponziani F., Formica A. (2012a) - The Emilia thrust earthquake of 20 May 2012 (Northern Italy): strong motion and geological observations - Report 1.
- Dolce M., Nicoletti M., Ammirati A., Bianconi R., Filippi L., Gorini A., Marcucci S., Palma F., Zambonelli E., Lavecchia G., De Nardis R., Brozzetti F., Boncio P., Cirillo D., Romano A., Costa G., Gallo A., Tiberi L., Zoppè G., Suhadolc P., Ponziani F., Formica A. (2012b) - The Ferrara arc thrust earthquakes of May-June 2012 (Northern Italy): strong-motion and geological observations - Report 2.
- DGR 1677/2005 (2005) - Prime indicazioni applicative in merito al decreto ministeriale 14 settembre 2005 recante - Norme tecniche per le costruzioni.
- Ghosh S.K., Cleland N. (2012) - "Observations from the February 27, earthquake in Chile," *PCI Journal* 57:1, 52-75.
- D.M. 3/12/1987 (1987) - Norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo delle costruzioni prefabbricate.
- D.M. 14/2/1992 (1992) - Norme tecniche per l'esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche.
- D.M. 9/1/1996 (1996) - Norme Tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche.
- D.M. 16/1/1996 (1996) - Norme Tecniche relative ai Criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi.
- D.M. 16/1/1996 (1996) - Norme Tecniche relative alle costruzioni in zona sismica.
- D.M. 14/1/2008 (2008) - Norme Tecniche per le Costruzioni.
- Iverson J.K., Hawkins N.M. (1994) - "Performance of Precast/Prestressed concrete building structures during Northridge Earthquake," *PCI Journal* 39:2, 38-56.
- Khare R.K., Maniyar M.M., Uma S.R., Bidwai V.B. (2011) - "Seismic performance and design of precast concrete building structures: An overview," *Journal of Structural Engineering (Madras)* 38:3, 272-284.
- Lucantoni A., Bosi V., Brammerini F., De Marco R., Lo Presti T., Naso G., Sabetta F. (2001) - "Il rischio sismico in Italia", *Ingegneria Sismica*, XVIII:1, 5-36.
- Muguruma H., Nishiyama M., Watanabe F. (1995) - "Lessons learned from the Kobe earthquake - a Japanese perspective," *PCI Journal* 40:4, 28-42.
- Posada M., Wood S.L. (2002) - "Seismic Performance of Precast Industrial Buildings in Turkey," *Proc. Of the 7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Boston, U.S., Paper 543.
- Priolo E., Romanelli M., Barnaba C., Muccarelli M., Laurenzano G., Dall'Olio L., Abu Zeid N., Caputo R., Santarato G., Vignola L., Lizza C., Di Bartolomeo P. (2012) - "The Ferrara thrust earthquakes of May-June 2012: preliminary site response analysis at the sites of the OGS temporary network", *Annals of Geophysics*, 55:4, 591-597.
- OPCM 3274/2003 (2003) - Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica.
- OPCM 3431/2003 (2003) - Ulteriori modifiche ed integrazioni all'O.P.C.M. 20 marzo 2003 n. 3274, recante «Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica».
- PROGR. N. 1677/2005 (2005) - Prime indicazioni applicative in merito al decreto ministeriale 14 settembre 2005.
- Toniolo G., Colombo A. (2012) - "Precast concrete structures: The lessons learned from the L'Aquila.