

2.6 Osservazioni sulle strutture prefabbricate di edifici industriali e commerciali

M. Menegotto¹ ■

L'area investita dal sisma contiene intorno alla città de L'Aquila numerosi stabilimenti industriali ed edifici commerciali, molti dei quali realizzati con strutture di elementi in calcestruzzo prefabbricati, mentre non vi sono esempi di strutture prefabbricate per edifici con altre destinazioni d'uso. Non è disponibile una raccolta statistica sulla tipologia e la datazione, né una documentazione sui rispettivi progetti strutturali. Tuttavia, appare evidente che si tratti di costruzioni piuttosto recenti, realizzate soprattutto nell'ultimo decennio. Alcune, alla data del sisma, erano in fase di esecuzione, come quella in figura 1.

La maggior parte di esse è costituita da fabbricati a uno o due piani, alti 6 - 8 metri, con ossatura portante isostatica, essenzialmente pendolare, composta di elementi lineari (travi e pilastri), solai di grande luce (8 - 10 m e oltre) in lastre alveolari o tegoli binervati (cosiddetti TT o π , dalla forma della sezione) precompressi, tamponature esterne a pannelli in calcestruzzo: verticali (figg. 2, 3), appoggiati a terra e vincolati orizzontalmente in sommità, oppure orizzontali

(fig. 4), eventualmente con finestrate a nastro, vincolati ai pilastri in diversi modi.

Una ricognizione, compiuta dallo scrivente insieme all'ing. Antonella Colombo dell'Assobeton nei giorni susseguenti l'evento sismico del 6 Aprile 2009, ha permesso di osservare le condizioni delle strutture, prima che ne fossero rimosse le parti rovinate. Sono state visitati, in concomitanza con le ispezioni di agibilità, gli edifici a struttura in calcestruzzo prefabbricato, nelle zone di Pile, Bazzano, Monticchio, Ocre, Poggio Picenze, Popoli.

L'esecuzione è in generale buona, sia costruttivamente sia nelle finiture, anche perché molti edifici rivestono una funzione di biglietto da visita della ditta costruttrice e dell'azienda che vi lavora.

Rispetto alle conseguenze osservate dopo gli eventi sismici di trenta anni fa' nel Friuli ed in Campania su edifici degli stessi tipi, si è riscontrato un miglioramento essenziale del comportamento. Allora, su analoghe strutture prefabbricate a ossatura portante, si erano evidenziati danni, specialmente nei pilastri, per difetto di



Fig. 1
Edificio a struttura prefabbricata in costruzione, con pannelli esterni e tegoli rovesciati.

Fig. 2
Perdita del pannello verticale d'angolo.

Fig. 3
Pannelli verticali ribaltatisi su una intera facciata e rimasti in posizione sulle altre.

Fig. 4
Edificio con pannelli orizzontali caduti lungo una facciata.



¹ Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica - Sapienza - Università di Roma. www.uniroma1.it

Fig. 5
Danni locali alla base di un pilastro e di un pannello di tamponatura.



Fig. 6
Danni locali a una estremità di trave interna.



Fig. 7
Danni locali alla sommità di un pilastro interno.



Fig. 8
Perdita di appoggio di un elemento di copertura per mancanza di ritegni antisismici.



Fig. 9
Espulsione delle tamponature in edificio con struttura eseguita in opera.



Fig. 10
Distacco di pannelli prefabbricati di facciata, presso un angolo.



Fig. 11
Distacco di pannelli prefabbricati di facciata, presso un angolo.



Fig. 12
Ribaltamento parziale dei pannelli di facciata, con altri e l'ossatura interna integri.



Fig. 13
Ribaltamento di travipannello di facciata.



Fig. 14
Cedimento tipico di inserti sollecitati in direzione impropria e danno locale all'ossatura portante.



dimensionamento o di particolari costruttivi (staffatura, ancoraggi) e per mancanza/insufficienza di ritegni sismici negli elementi portati in semplice appoggio.

Con l'odierno sisma aquilano, va rilevato innanzi tutto che vi sono edifici, del tipo in questione, che praticamente non hanno sofferto danni. Al di là delle ragioni singole, ciò significa che le prescrizioni normative e le raccomandazioni intervenute sono mediamente acquisite; costituisce pertanto un dato rassicurante, sia pure nei limiti di un contesto con aspetti negativi, che richiedono approfondimenti e revisioni della prassi progettuale, cui si accenna più oltre.

Ciò prova, inoltre, che le estese ricerche sperimentali e numeriche – svolte in ambito europeo, quali "Seismic behaviour of reinforced concrete industrial buildings" (programma ECOLEADER), "Precast structures EC8" (programma GROWTH) e "Performance of innovative mechanical connections in precast building structures under seismic conditions" (programma SAFECAST) sul comportamento di tale tipologia costruttiva, e che hanno dato luogo a prescrizioni, recepite ora nell'Eurocodice 8 e nelle norme europee di prodotto, nonché nelle norme nazionali specifiche per la prefabbricazione – hanno raggiunto lo scopo di far realizzare tali strutture secondo i criteri più moderni e modalità rispondenti, di massima, alle indicazioni sui dimensionamenti, sui particolari costruttivi e sulle connessioni nei vincoli, date dalle dette norme.

Alcune strutture hanno subito lievi danni, circoscritti alle sezioni più sollecitate o presso le unioni (figg. 4, 5) e dovuti alla presenza di elementi di collegamento validi qualitativamente ma di dimensioni insufficienti, oppure espulsione di copriferrì (figg. 5, 6, 7); danni senz'altro attendibili dopo eventi del genere e previsti nei criteri di progettazione secondo le norme tecniche. Vi sono dei casi di fuoriuscita dalla sede di supporto, nei quali non si è tenuto conto dell'obbligatorietà dei ritegni antisismici (fig. 8), stabilita ormai dalle norme tecniche per le costruzioni in zona sismica (successivi DM in applicazione della L. 64/1974), che non consentono, negli appoggi, di fare affidamento sull'attrito dovuto al peso per resistere agli effetti delle azioni orizzontali.

Altre strutture, di edifici danneggiati più estesamente, hanno avuto comportamenti che evidenziano pregi e difetti comuni, corrispondenti a criteri di progettazione fra loro simili.

Da una parte, quelle che verosimilmente sono state considerate dai progettisti le *strutture portanti* in sé dell'edificio, cioè l'insieme di travi,

pilastri solai e fondazioni, hanno risposto apparentemente bene ovunque, subendo direttamente danni nulli o minori, quali sopra ricordati. Dall'altra parte, l'osservazione degli edifici prefabbricati coinvolti in questo sisma ha messo in evidenza una carenza residua di non poca importanza, relativa alla concezione progettuale comune alla maggior parte dei casi in cui si sono verificati danni.

Si è rivelata cioè carente la percezione dell'*interazione* fra "struttura" ed "elementi non strutturali"; nella fattispecie fra l'ossatura di elementi lineari e i pannelli in calcestruzzo di tamponatura.

Evidentemente, non è ancora stata recepita (almeno fino a ieri) da molti progettisti la necessità di includere nel modello strutturale anche gli elementi non strutturali "portati" che sono anche portatori di rigidità, propria e dei vincoli, non trascurabile, pur se non intenzionale.

Tale evidenza è apparsa generale, peraltro emergendo anche in molti edifici residenziali non prefabbricati, che hanno subito danni dal medesimo evento. In questi ultimi, si sono dati casi di tamponature in laterizio o in blocchi, fortemente danneggiate, perché incapaci di resistere alla deformazione (nel piano) impressa loro dai telai in calcestruzzo armato; oppure espulse dall'accelerazione (ortogonale), perché non ben connesse alla struttura stessa (fig. 9). In alcuni dei casi, l'insieme delle tamponature ha anche condizionato, positivamente o negativamente a seconda della loro disposizione, la risposta dell'intera struttura.

Negli edifici prefabbricati con tamponature a pannelli o con travi-pannello, il fenomeno è stato analogo ma con particolarità diverse. Infatti, i pannelli erano sufficientemente robusti da garantire la propria integrità; inoltre, normalmente vi erano state previste delle connessioni mediante inserti metallici, *parzialmente adeguate* se così si può dire. Erano infatti dimensionate solo per vincolare il pannello rispetto alle sollecitazioni derivanti dalle forze d'inerzia proprie, malgrado quanto possa sembrare dagli spostamenti finali dei pannelli avvenuti verso l'esterno e che vanno dal distacco, nei casi più lievi (figg. 2, 10, 11), al ribaltamento, nei casi più gravi (figg. 1, 3, 4, 12, 13), dove le rotture dei pannelli stessi sono in genere l'effetto e non la causa della caduta.

Le tamponature con pannelli in calcestruzzo armato possono essere gli elementi di gran lunga più rigidi della costruzione e assorbire perciò l'azione sismica orizzontale relativa all'intero edificio, se e finché vi sono collegate. Ciononostante, si considerano talvolta nella pro-

Fig. 15
Particolare del caso in fig. 14.



Fig. 16
Cedimento di inserto con apertura della sede di aggancio nei pannelli.



Fig. 17 - 18
Cedimento per tranciatura delle piastrine metalliche.



Fig. 19
Cedimento per tranciatura delle piastrine metalliche.



Fig. 20
Cedimento di inserto per strappo della zincatura nel calcestruzzo.



gettazione come *elementi non strutturali* e, semplificando troppo, se ne trascura la rigidezza. Le connessioni stesse, quali quelle impiegate, di fatto risultano rigide riguardo agli scorrimenti paralleli al piano dei pannelli. Pertanto, inizialmente chiamano questi a partecipare alla rigidezza d'insieme nella risposta sismica parallela, assorbendo di conseguenza grandi forze d'inerzia, per le quali non sono dimensionate, e quindi cedono. Ciò comporta non tanto danni alla struttura principale, che torna così alla rigidezza prevista, ma l'effetto collaterale di non funzionare più contro il ribaltamento, che ha poi luogo. Effetto indesiderato, non lieve, che, se si fossero considerati modelli di comportamento strutturale più aderenti, anche approssimati, si sarebbe evitato, modificando il criterio di collegamento delle tamponature, in un senso o nell'altro, come appresso.

Si è detto che le ossature portanti vere e proprie sono rimaste sostanzialmente senza danni. In

alcuni casi, peraltro, l'aver trascurato la partecipazione delle tamponature, attraverso i loro collegamenti rigidi, ha provocato nelle ossature danni indiretti localizzati, come appare ad esempio dal particolare in figura 14 e 15, seppure in misura inferiore a quanto avvenuto per certe strutture eseguite in opera.

Dall'esame e la verifica degli inserti di vincolo dei pannelli caduti, appare chiaro come si siano prima rotti per una sollecitazione di scorrimento fra trave e pannello e poi non abbiano potuto trattenere quest'ultimo dal ribaltamento. La sollecitazione di scorrimento complanare non era stata prevista nel dimensionamento dell'inserto, per l'intensità verificatasi: perciò lo ha portato a rottura, rendendolo inservibile per la funzione ortogonale, la sola prevista.

I vari cedimenti degli inserti, a seguito delle sollecitazioni per essi abnormi, sono avvenuti per apertura delle sedi di aggancio nei pannelli (figg. 15, 16), per tranciatura delle piastrine metalliche

(figg. 17, 18, 19) o per strappo della zancatura nel calcestruzzo, come nella figura 20.

In genere, tale modo di crisi si è riscontrato su un intero lato del fabbricato (figg. 1, 3, 4, 12), secondo un meccanismo in serie che ne conferma l'interpretazione. Si può anche osservare che, in altri edifici consimili ovvero in altri lati degli edifici visti, gli inserti possono aver subito danni senza giungere alla crisi. Di ciò occorre tener conto nelle operazioni di accertamento e di adeguamento degli edifici stessi, oltre che per le progettazioni future di nuovi.

Sarebbe riduttivo dire che la progettazione ha ommesso di considerare lo *stato limite di danno*, non avendo la carenza provocato il collasso della struttura. Intanto, il danno è considerevole e ha comportato il collasso di elementi importanti, che non fanno parte della struttura principale ma non sono neppure secondari; collassi che, oltre a richiedere interventi di ripristino lunghi e costosi, avrebbero potuto provocare anche vittime, qualora il sisma fosse avvenuto in orario lavorativo.

In realtà, quindi, tale semplificazione si deve definire una carenza concettuale inaccettabile di progettazione. Si deve biasimare senz'altro il peccato; il peccatore fino a ieri poteva essere mediamente non abbastanza edotto e maturo sul particolare argomento, pur essendo progredito molto negli ultimi decenni sui criteri innovativi di progettazione e verifica, e forse perciò non imputabile. Ma da oggi non può più essere così. Com'è già scritto da tempo nei testi di insegnamento e normativi, lo schema strutturale di progetto *deve considerare* gli effetti sfavorevoli degli irrigidimenti non strutturali presenti, aprendo la scelta ineludibile fra due possibilità: svincolare gli elementi rigidi, in modo che non interagiscano

con la struttura, oppure integrarli nella struttura stessa, dotandoli delle capacità necessarie.

Nella fattispecie, è necessario che i pannelli di tamponatura, come tutti gli elementi non strutturali rigidi, abbiano collegamenti che: o permettano le deformazioni relative con la struttura attese, senza opporre reazione (garantendo la *compatibilità*); o siano in grado di trasmettere le sollecitazioni massime, nell'ipotesi di piena collaborazione fra gli uni e l'altra (garantendo la *resistenza*). La prima soluzione richiede vincoli rigorosamente unidirezionali, delicati per realizzazione e mantenimento. La seconda, che rende le tamponature anch'esse *strutturali* in tutto e per tutto, con coerenti dimensionamenti degli elementi e delle molteplici connessioni (fra pannelli e ossatura, critiche negli esempi mostrati, come pure fra pannello e pannello e fra pannello e fondazione), risulta probabilmente la migliore in fin dei conti, anche se comporta modifiche nella realizzazione dei pannelli. Essa rende la costruzione più rigida e meno danneggiabile da sismi di qualunque intensità, con riguardo anche agli elementi veramente non strutturali, come infissi, finiture e impianti. Ferma restando la necessità di una modellazione esauriente nell'analisi strutturale, in ogni caso.

Una lezione importante per i progettisti, data dall'esperienza di questo evento tragico, è infatti che bisogna adottare per ogni tipo di struttura un modello realisticamente aderente al vero, senza trascurare nulla di rilevante, per elaborare gli stati di sollecitazione e deformazione della intera costruzione, e valutare poi i dovuti margini riguardo ai vari stati limite stabiliti.

Come è stato detto autorevolmente, e vale in ogni campo della tecnica, l'analisi dei problemi va semplificata il più possibile, ma non oltre.