

2.11 Il comportamento delle strutture industriali nell'evento de L'Aquila

B. Faggiano¹, I. Iervolino¹, G. Magliulo¹, G. Manfredi¹, I. Vanzi² ■

2.11.1 Introduzione

Questo contributo si riferisce sia alle strutture industriali tipo *edificio* sia alle strutture industriali di tipo *non edificio* (impianti). Per quanto riguarda le prime, il terremoto de L'Aquila dell'aprile 2009 rappresenta il primo vero esempio in Italia di risposta sismica su ampia scala di edifici produttivi. Questi, ormai da molti anni, sono molto spesso realizzati con elementi prefabbricati in cemento armato. Il terremoto ne ha evidenziato le maggiori debolezze ascrivibili principalmente a deficienze o nei criteri progettuali o nella realizzazione. Si sono, infatti, evidenziate insufficienti distanze tra strutture adiacenti, causa di fenomeni di martellamento, di insufficiente lunghezza delle selle di appoggio degli elementi (spesso travi di copertura), di insufficiente resistenza degli elementi perimetrali di tamponatura. Tra le seconde, si sono frequentemente osservate rotture localizzate in corrispondenza degli

appoggi degli elementi orizzontali, dovute all'effetto combinato dell'esiguità delle lunghezze di appoggio e di copriferro maggiore di quanto specificato in progetto. Per quanto riguarda le strutture industriali di tipo non edificio si fa riferimento ai sili, adibiti allo stoccaggio del polipropilene, della multinazionale Vibac (azienda chimica produttrice di film-plastica), situata a Bazzano, nei pressi di Onna (AQ). Essi presentano un caso interessante di danneggiamento a costruzioni metalliche. Alcuni di essi sono crollati, altri sono rimasti in sede fortemente deformati, sia localmente in corrispondenza di alcuni anelli, sia diffusamente. In particolare tipiche modalità di rottura che si sono verificate durante tale evento sismico sono: lo schiacciamento degli anelli di base (*elephant foot buckling*); le deformazioni indotte da fenomeni d'instabilità; il martellamento sulle costruzioni in calcestruzzo armato prefabbricato circostanti.

2.11.2 Strutture industriali di tipo edificio

Gli edifici industriali, ormai da molti anni, sono molto spesso realizzati con elementi prefabbricati in cemento armato. Il terremoto de L'Aquila dell'aprile 2009 rappresenta il primo evento sismico in Italia che ha coinvolto su ampia scala edifici produttivi. Infatti, il terremoto dell'Irpinia del 1980 non ha interessato zone particolarmente industrializzate, come del resto quelli dell'Umbria e del Molise; gli effetti di questi ultimi, per giunta, si risentirono in termini significativi su un territorio di estensione molto limitata. Per osservare alcuni danni a tale tipologia di costruzioni bisognerebbe risalire al terremoto del Friuli del 1976, ma in tal caso i danni hanno riguardato strutture progettate in assenza di prescrizioni antisismiche e, comunque, con concezioni obsolete. La provincia de L'Aquila, invece, rappresenta un'interessante realtà industriale, per di più in via di sviluppo. Le concentrazioni industriali di Pile, Bazzano, Monticchio ed Ocre sono fortemente caratterizzate da edifici in cemento armato prefabbricato a ossatura portante, vale a dire con elementi portanti rap-

presentati da travi e pilastri; generalmente essi risultano essere monopiano, raramente, e a volte parzialmente, a due piani. I pilastri presentano la testa con o senza forcilla; sovente sono caratterizzati da mensole tozze (selle) sulle quali poggia il carroponete oppure, nel caso di edifici a due piani, poggiano le travi del livello intermedio. L'orditura delle travi è spesso classicamente trasversale, con elementi a sezione variabile in altezza, di forma ad I e trave di gronda longitudinale; si osservano comunque anche casi di orditura longitudinale. La sezione si può presentare a T rovescio, in modo da consentire l'appoggio dei tegoli e, nel caso di piano intermedio, il getto integrativo. La copertura è generalmente caratterizzata da tegoli, spesso di forma a π , raramente ad U, talvolta intervallati da lucernai; tegoli a π vengono utilizzati anche per l'impalcato intermedio, nei pochi casi in cui è presente. Le tamponature esterne, talvolta realizzate in opera in mattoni, sono costituite da pannelli prefabbricati in c.a. verticali o, meno frequentemente, orizzontali, non nervati. Relativamente ai collegamenti, quelli pilastro-fonda-

¹ Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi di Napoli Federico II. www.unina.it

² Dip. di Progettazione, Riabilitazione e Controllo delle Strutture Architettoniche, Università di Chieti. www.unich.it

zione sono caratterizzati, come quasi sempre accade sul territorio nazionale, da plinti a bicchiere, che garantiscono il vincolo incastro. I collegamenti trave-pilastro sono spinottati, quindi incernierati, almeno da un lato, generalmente con interposto pacchetto di neoprene per la distribuzione dei carichi. Come già indicato, il collegamento in testa al pilastro è sovente realizzato mediante la forcilla, mentre nel caso di livello intermedio, esso avviene su mensola tozza. Il collegamento tegolo-trave si presenta spesso non vincolato agli spostamenti orizzontali e privo di pacchetto di neoprene per la ripartizione dei carichi; raramente, invece, è spinottato, con foro nel tegolo e spinotto uscente dalla trave. I tegoli sono uniti fra loro dal getto integrativo, quando presente, altrimenti non sono collegati oppure il collegamento è rappresentato da piastrine metalliche saldate fra loro, la cui presenza, però, non è facilmente individuabile con una semplice indagine visiva. I pannelli di tamponatura sono collegati o alla trave di gronda o al pilastro mediante inserti in vario modo. Talvolta accade che essi siano collegati

agli elementi di impalcato, quali i tegoli. Una delle tipologie riscontrate appartenente al primo caso prevede un profilo annegato nel pannello verticale; un bullone è inserito in tale profilo e mediante dado è collegato ad un angolare, che, in virtù della sua forma, può essere vincolato al bordo del canale della trave di gronda. Relativamente al collegamento pannello-pilastro, diffusa è la tipologia con profilo annegato nel pilastro e baionetta con boccola collegata mediante un bullone molto lungo al pannello. Quest'ultimo sistema consente anche il collegamento delle tamponature all'impalcato costituito da tegoli. Raramente è stato anche riscontrato il collegamento delle tamponature alla struttura portante mediante angolari e bulloni. Il numero osservato di edifici caratterizzati da un sistema strutturale a pannelli portanti è decisamente inferiore rispetto a quello degli edifici ad ossatura portante. Alcuni edifici industriali prefabbricati il 6 aprile 2009 erano ancora in fase di completamento; conseguentemente è stato possibile osservare il comportamento di tali strutture sotto eccitazione sismica in diversi stadi transitori.

2.11.3 Analisi dei danni e delle prestazioni nel terremoto

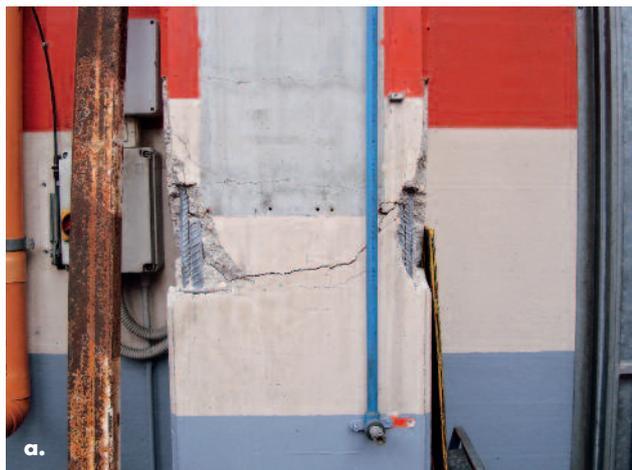
Gli elementi strutturali degli edifici industriali hanno risposto al terremoto del 6 aprile 2009 in maniera generalmente conforme a quanto previsto dalla normativa con cui sono stati realizzati: nessun pilastro è collassato, sebbene, in diversi casi, si sia osservata la formazione di una cerniera plastica, giustificata dall'intensità dell'azione sismica (Fig. 1). In qualche caso tale cerniera non si è formata esattamente alla base del pilastro, vale a dire in corrispondenza dell'attacco con la fondazione, ma anche oltre un metro al di sopra, in corrispondenza della diminuzione di armatura longitudinale. Inoltre non si sono riscontrati casi di formazione di cerniera plastica in travi o tegoli per incremento dell'azione verticale. Tuttavia, il danneggiamento degli edifici industriali prefabbricati va analizzato attentamente; questo, infatti, è stato caratterizzato da collassi parziali, che, qualora la scossa principale fosse avvenuta in orario lavorativo anziché alle 3 del mattino, avrebbero probabilmente causato vittime.

Lo schema statico della parte in c.a. presenta alta deformabilità; e pertanto la maggior parte dei danni riscontrati alle parti strutturali (calcestruzzo armato) dipende da spostamenti relativi tra gli elementi. Infatti, si sono sistematicamente osservati fenomeni di martellamento tra elementi

appartenenti alla stessa struttura. Si sono inoltre spesso osservati fenomeni di martellamento tra edifici adiacenti, sia per le strutture prefabbricate sia per quelle gettate in opera, a causa dell'esiguità dei giunti di separazione. In figura 2, tratta da Giordano et al. (2009), è evidenziato il martellamento tra i tegoli e la trave di copertura per un edificio industriale prefabbricato sito in Bazzano.

A conferma degli studi numerici (Magliulo et al., 2008; Capozzi et al., 2009) condotti negli ultimi anni, i collegamenti hanno rappresentato gli elementi deboli in termini di prestazioni sismiche di tali edifici sia di vecchia che di nuova costruzione. Alcuni edifici hanno riportato danni al collegamento trave-pilastro: l'unico caso osservato di collasso di travi in edifici prefabbricati è stato proprio determinato dal deterioramento di tale collegamento e dal collasso per perdita di appoggio. Infatti, come prevedibile da indagini parametriche (Capozzi et al., 2009), si è avuta la rottura del calcestruzzo funzionante da copri-ferro per lo spinotto, lì dove era minimo lo spessore. Nella stessa struttura, in corrispondenza di altri traversi, è possibile osservare anche il collasso della trave per perdita di appoggio in corrispondenza del lato privo di spinotto, a causa dello spostamento eccessivo, ed il martellamento tra trave e forcilla (Fig. 3).

Il fenomeno di rottura del calcestruzzo di copri-



ferro dello spinotto è anche riscontrabile al livello intermedio in alcuni edifici prefabbricati a due piani, per i quali, come detto, il collegamento trave-pilastro è su mensola tozza. Lo stesso fenomeno ha anche caratterizzato il collasso di alcuni tegoli. In tal caso, infatti, anche lì dove cautelativamente il collegamento tegolo-trave era stato assicurato mediante spinotto, l'esiguo spessore del calcestruzzo di copriferro dello spinotto sulla trave, per giunta con insufficiente staffatura, ha ceduto, con la conseguente perdita di appoggio del tegolo (Fig. 4a). Ovviamente tale perdita di appoggio si è verificata con maggiore facilità nei casi in cui non è stato previsto alcun collegamento fisso tegolo-trave e/o unione relativa tegolo-tegolo; tra questi, particolarmente sfortunate le situazioni caratterizzate da edifici in fase di montaggio, in cui la soletta collaborante del solaio, sebbene prevista, non era stata ancora realizzata.

I danni più importanti e diffusi agli edifici industriali prefabbricati causati dal terremoto del 6 aprile 2009 sono, però, quelli relativi alle tamponature; del resto, il rilevante danneggiamento agli elementi di perimetro, sebbene le tipologie costruttive siano differenti, accomuna tali edifici a quelli realizzati in c.a. gettato in opera. Il vincolo in testa dei pannelli verticali al bordo del canale della trave di gronda, realizzato mediante profilo annegato nel pannello, bullone con dado ed angolare, ha talvolta ceduto o per rottura dell'angolare e/o per fuoriuscita della testa del bullone dal profilo (Fig. 4b). Tale fuoriuscita è stata anche una delle cause del collasso dei pannelli collegati ai pilastri con profilo annegato nel pilastro e baionetta con boccola collegata mediante bullone al pannello; per tale tipologia di collegamento talvolta si è riscontrata anche la rottura della baionetta in corrispondenza della boccola. In altri casi la rottura è

dovuta alla fuoriuscita di tutto il profilo dal pannello in cui era annegato. La tenuta del collegamento è apparsa migliore nel caso in cui i pannelli sono collegati alla struttura mediante angolari e bulloni. Nel caso di tamponature costituite da mattoni, l'azione sismica ha determinato lo spanciamento rispetto al piano verticale, in tanti casi fino all'espulsione dei mattoni ed al conseguente collasso parziale o totale della tamponatura. Infine, tra gli errori di realizzazione, val la pena segnalare, per le strutture prefabbricate, i problemi di rottura localizzata in corrispondenza delle selle di appoggio delle travi sui pilastri. In figura 5, tratta da Camata et al. (2009), è riportata una situazione di incipiente collasso, causata dall'aumento del copriferro nel pilastro per rispetto delle specifiche per la resistenza al fuoco; si è pertanto creato, proprio nella zona dell'appoggio della trave, un volume di calcestruzzo non armato.

Fig. 1
Formazione di cerniera plastica in pilastri di edifici produttivi: (a) autorimessa FIAT sita a Pile; (b) edificio adibito ad allevamento bovino sito a Fossa.

Fig. 2
Effetti del martellamento tra la trave e i tegoli di copertura (Giordano et al. 2009).

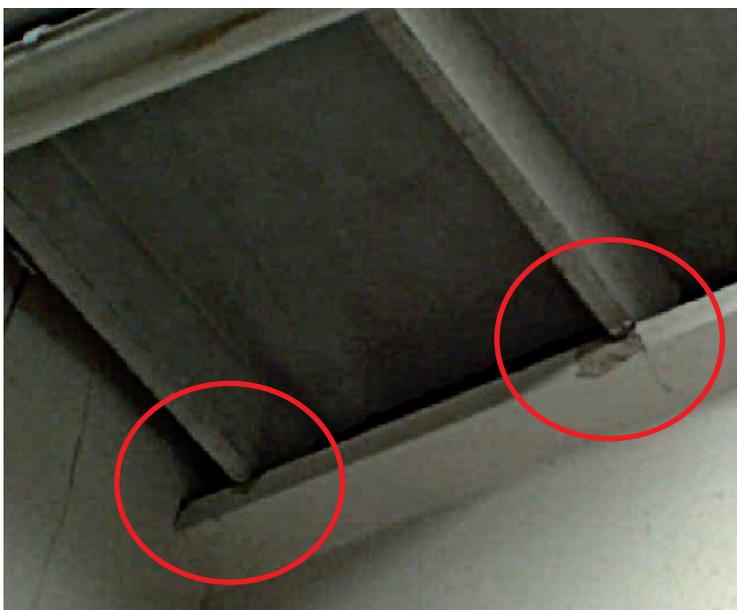




Fig. 3
Collasso di travi per perdita di appoggio di un edificio adibito ad allevamento bovino sito a Fossa.

Fig. 4
(a) Collasso di tegoli per rottura del calcestruzzo di coprifermo e perdita di appoggio in un' autorimessa FIAT a Pile.
(b) Collasso di pannelli di tamponatura per rottura dell'angolare o fuoriuscita della testa del bullone dal profilo in un edificio adibito a deposito materiale e macchinari sito a Bazzano.

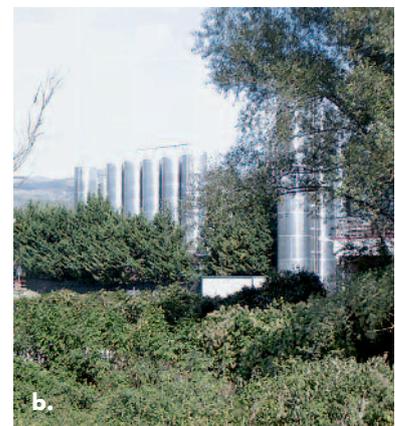
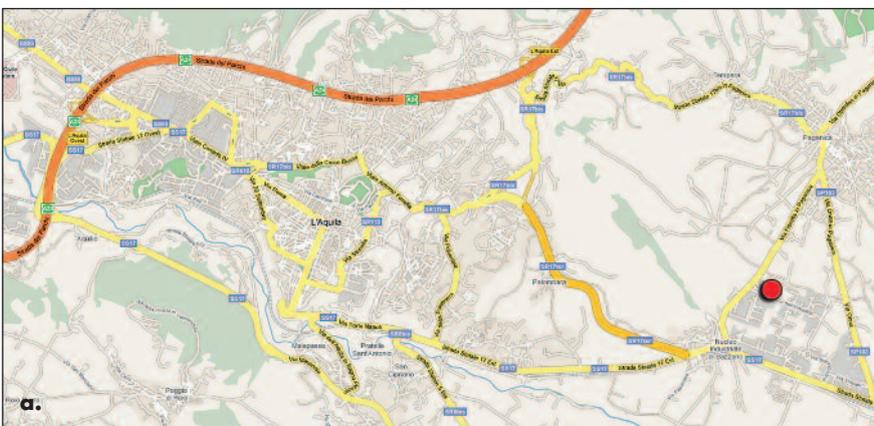
2.10.4 Strutture industriali di tipo non-edificio: il caso dei Sili Vibac a Bazzano.

I sili della multinazionale Vibac (azienda chimica produttrice di film-plastica), situata a Bazzano, nei pressi di Onna (Fig. 6) presentano un caso eccezionale di danneggiamento a costruzioni metalliche, nonché rappresentano un caso emblematico di danneggiamento indotto dal sisma del 6 Aprile. I sili sono adibiti allo stoccaggio del polipropilene in perle, al momento del terremoto essi erano pieni (EERI, 2009). Alcuni sili sono crollati, altri sono rimasti in sede fortemente deformati, sia localmente in corrispondenza di alcuni anelli, sia diffusamente (Fig. 7). Ad un esame visivo più ravvicinato i crolli sono avvenuti per ribaltamento dovuto allo schiacciamento degli anelli di base e della tramoggia. Inoltre lungo l'altezza dei sili sono evidenti deformazioni indotte da fenomeni d'instabilità delle pareti che risultano essere imbozzate. In alcuni casi si è riscontrato un effetto di martellamento sulle costruzioni in calcestruzzo armato prefabbricato circostanti, le quali hanno conseguito la rottura parziale delle tamponature e a loro volta hanno indotto forti deformazioni dei cilindri metallici dei

sili. Tali forme di danneggiamento sono chiaro effetto della componente verticale del sisma, di cui ne evidenziano l'importanza (Fig. 7). I sili della Vibac hanno struttura metallica. Generalmente per loro concezione i sili hanno un peso strutturale molto basso, normalmente notevolmente inferiore rispetto al peso del materiale portato. Tale caratteristica implica una struttura molto snella con spessore dei pannelli di rivestimento dell'ordine dei micromillimetri. E' evidente che tali strutture presentano una spiccata sensibilità ai fenomeni di instabilità sia locale sia globale. Infatti la modalità di collasso più comune è l'instabilità delle pareti per effetto delle azioni assiali di compressione. Tali azioni sono dovute all'attrito esercitato dal materiale insilato sulle pareti. La pressione orizzontale diametrale esercitata sulla superficie del cilindro dal materiale insilato stabilizza lo stesso nei confronti dell'imbozzamento e dei fenomeni di instabilità delle pareti del silo, generando un campo di tensioni di trazione di tipo membranale. La distribuzione ed entità delle sollecitazioni in ognuna delle parti costituenti il silo, il cilindro e la tramoggia, è fortemente influenzata dal comportamento di estra-



Fig. 5
Rottura localizzata della sella di appoggio della trave.



zione del materiale, che a sua volta dipende dalla forma del silo.

I silos della Vibac hanno una forma allungata tipicamente usata per lo stoccaggio di materiale plastico. Il comportamento di estrazione prevalente è dunque quello del tipo cosiddetto "di massa", avente la caratteristica che il primo materiale a fuoriuscire è quello che è stato inserito per primo nel silo, tutta la massa di materiale è in movimento nella fuoriuscita. Per contro nel caso dei silos con forma tozza, prevale il comportamento di estrazione del tipo "a fumaiolo", avente la caratteristica che si crea un tubo centrale nella massa di materiale, che viene risucchiato dalla tramoggia. Tale "tubo" è alimentato dal materiale insilato a tutta altezza; la parte di materiale esterna al tubo resta ferma durante la fuoriuscita. In particolare, nei silos allungati, quando completamente pieni, lungo l'altezza del cilindro, dalle fasce più alte la pressione diametrale cresce verso il basso fino ad assumere un valore costante, infine in corrispondenza della variazione di sezione, che si restringe a partire dall'anello dove si innesta la tramoggia, si generano degli elevati picchi di tensione. Ovviamente nel caso di silos vuoti o parzialmente pieni il comportamento risulta differente, perdendosi l'effetto stabilizzante delle pressioni diametrali nella parte vuota con

conseguente brusca variazione della tensione critica. Variazioni di pressione all'interno dei silos dipendono anche dalla fuoriuscita del materiale attraverso la tramoggia, che provoca un effetto di risucchio e quindi depressioni. Per poter controllare e regolare tale effetto i silos sono provvisti di valvole di pressione. Alla luce di ciò è plausibile che da un lato l'effetto della componente verticale del sisma ha provocato un brusco e importante incremento delle azioni di compressione nelle pareti dei silos, instabilizzanti, contemporaneamente l'azione sismica in tutte le sue componenti ha accentuato l'effetto di eventuali distribuzioni asimmetriche di pressioni, dovute ad eccentricità strutturali, o al metodo di riempimento dei silos o all'anisotropia del materiale insilato, provocando una riduzione dell'effetto stabilizzante delle pressioni diametrali stesse. A ciò si può aggiungere che imbozzamenti costruttivi in corrispondenza dei giunti tra le fasce anulari di rivestimento dei silos, considerando inoltre che i giunti in ogni caso rappresentano una discontinuità nel flusso delle tensioni longitudinali di compressione, con elevate tensioni localizzate. Quanto detto giustifica pienamente il comportamento al collasso riscontrato in occasione del terremoto Aquilano del 6 Aprile.

Figura 6.
(a) Localizzazione dello stabilimento VIBAC nel comune di Bazzano (AQ).
(b) Silos prima del sisma.



Fig. 7
Immagini dei silos del sisma.
Foto di G. Verderame,
ISPRA, F.M. Mazzolani.

2.11.5 Conclusioni

La maggior parte degli edifici sedi di attività produttive investiti dal terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009 sono strutture prefabbricate in cemento armato monopiano. I danni da esse subiti a seguito del terremoto sono legati alla grande deformabilità degli elementi strutturali e, soprattutto, alla cattiva prestazione di alcuni collegamenti, in particolare quelli relativi alle tamponature. Infatti spesso si sono avuti fenomeni di martellamento; in alcuni casi, inoltre, si è osservata la rottura del calcestruzzo di copriferro dello spinotto nei collegamenti trave-pilastro e tegolo-trave con conseguente collasso per perdita di appoggio, in altri la rottura dei profili, dei bulloni e/o degli angolari caratterizzanti il collegamento delle tamponature con la struttura. L'elevata frequenza con cui sono stati osservati tali fenomeni suggerisce la necessità di dedicare maggiore attenzione, da un punto di vista di ricerca e normativo, a tali aspetti, i quali, benché caratterizzati da meccanismi strutturali di facile comprensione, causano spesso la messa fuori servizio dell'intera struttura danneggiata: di primaria importanza appare sicu-

mente la caratterizzazione meccanica in termini di prestazioni sismiche dei vari collegamenti presenti nelle strutture industriali prefabbricate.

Per quanto riguarda le strutture di tipo non-edificio, il caso dei silos della Vibac di Bazzano evidenzia che fino ad oggi, i silos sono stati considerati come strutture che non si progettano nel rispetto di appropriati requisiti in zona sismica. In tale ottica evidentemente è necessario avere cura durante la fase di progettazione che il rischio di danneggiamento delle strutture, nonché di incidente industriale rilevante nel caso di contenimento di sostanze pericolose, sia controllato e adeguatamente limitato.

Si sottolinea infine che la tipologia dei danni rilevata generalmente nelle strutture industriali, siano esse dei cosiddetti tipi edificio e non edificio, strettamente può essere stata influenzata dalle caratteristiche di *campo vicino* del moto al suolo e della sua intensa componente verticale. Alla luce di quanto accaduto si ritiene di particolare importanza una revisione ed integrazione delle prescrizioni normative che tengano in dovuto conto le specificità dei terremoti prossimi alla sorgente.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il prof. Alberto Mandara per aver fornito un prezioso contributo alla documentazione tecnico-scientifica sulle tipologie costruttive dei

sili, l'Ing. Vittorio Capozzi per la collaborazione scientifica relativa allo studio dei collegamenti con spinotto, gli Ingg. Antonella Colombo e Stefano Terletti per il confronto di idee in merito ai danni osservati.

Bibliografia

Camata C., Biondi S., De Matteis G., Lai C., Spacone E., Vanzi I., Vasta M., Post damage assessment of the L'Aquila, Abruzzi, April 6th, 2009 earthquake, Compdyn 2009, Rhodes, Greece, 22-24 June 2009.

Capozzi V., Magliulo G., Manfredi G. - Resistenza a taglio delle connessioni trave-pilastro spinottate nelle strutture prefabbricate. Industrie Manufatti Cementizi, Giugno/Agosto 2009. Anno 5° n°9.

EERI Special Earthquake Report - June 2009. Learning from Earthquakes. The Mw 6.3 Abruzzo, Italy, Earthquake of April 6, 2009. Investigation team

leader Paolo Bazzurro, AIR Worldwide Corp., San Francisco <http://www.reluis.it/doc/report.html>.

UNI ENV 1993-4-1:2002.

Giordano F., Rasulo A., Vanzi I., Zambiano A. - Rapporto dei danni osservati su alcuni edifici industriali a seguito del terremoto abruzzese del 6/4/2009, Rapporto ReLUIS, Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica, <http://www.reluis.it/doc/report.html>

Magliulo G., Fabbrocino G., Manfredi, G. - Seismic assessment of existing precast industrial buildings using static and dynamic non linear analyses. Engineering Structures 2008, 30 (9), pp. 2580-2588, doi: 10.1016/j.engstruct.2008.02.003.