

MODELLAZIONE NON LINEARE DI UN AGGREGATO EDILIZIO SOGGETTO A INTERVENTO DI MIGLIORAMENTO SISMICO PARZIALE O TOTALE

Luigi SORRENTINO

Ricercatore

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Sapienza Università di Roma

via Antonio Gramsci 53, 00197 Roma

*luigi.sorrentino@uniroma1.it**

Ilaria LANCIA

Architetto

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Sapienza Università di Roma

via Antonio Gramsci 53, 00197 Roma

ilaria.lancia@gmail.com

Fabio FUMAGALLI

Assegnista di ricerca

Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Sapienza Università di Roma

via Antonio Gramsci 53, 00197 Roma

f.fumagalli@archiworld.it

Abstract

Il miglioramento sismico di aggregati edilizi è frequentemente ostacolato dalla frammentazione della proprietà e dalla conseguente difficoltà di effettuare un intervento sull'intero isolato. In questo lavoro si esamina un aggregato edilizio del centro storico di Prata, estesamente danneggiato dal sisma aquilano del 2009. Innanzitutto è stato condotto un rilievo delle strutture, del danneggiamento e della suddivisione proprietaria dell'aggregato in esame. Quindi è stata condotta una modellazione della risposta globale dell'aggregato mediante un codice di calcolo non lineare a macroelementi. La modellazione prevede il confronto fra a) stato di fatto, interventi estesi b) all'intero aggregato, c) a una larga parte dell'aggregato, d) a una singola unità immobiliare, e) a una porzione pari a circa la metà dell'isolato. Il lavoro evidenzia, come atteso, la maggiore efficacia di un intervento che coinvolga tutto l'aggregato, la sostanziale inutilità di un intervento localizzato, la pericolosità di interventi slegati su due porzioni equivalenti dell'aggregato e indaga la modifica nella distribuzione dei danneggiamenti che interventi parziali comportano.

Keywords: aggregati edilizi, modellazione globale, analisi non lineare, miglioramento sismico, interventi parziali.

1. Introduzione

Gli aggregati edilizi dei centri storici italiani presentano frequentemente un diffuso e marcato danneggiamento in occasione di eventi sismici. Tale risposta è dovuta alla combinazione di numerosi fattori che vanno dalla risposta locale di macroelementi murari, passano per l'interazione fra unità edilizie appartenenti a uno stesso aggregato, arrivano al comportamento dell'intero centro storico in quanto sistema di percorsi di relazione fra i diversi aggregati. Tale risposta può comportare inagibilità diffuse, con conseguente necessità di alloggiare altrove la popolazione residente, anche per risentimenti non particolarmente severi. Ne è esempio

Lucoli (AQ). A fronte di un risentimento in occasione del terremoto del 2009 stimato in VI-VII MCS [1], si è avuta una percentuale assai elevata di edifici inagibili. Nei centri storici dell'intero territorio comunale (ben sedici) si è avuta una media di edifici inagibili (esito E) pari al 49% del totale. In alcune frazioni tale valore è ancora più elevato, come nel caso del nucleo storico di Prata, dove oltre il 70% degli esiti è stato E e appena il 17% A (agibile). Migliorare la prestazione di un intero centro storico è operazione resa complessa dalla necessità di combinare strategie alla scala della singola unità edilizia, dell'aggregato strutturale, del nucleo storico nel suo complesso. Laddove quest'ultimo aspetto richiede un'apposita pianificazione da parte dell'Amministrazione Comunale, e l'intervento sull'unità edilizia può risolversi con l'accordo di uno o pochi proprietari, l'intervento su un intero aggregato coinvolge molti soggetti privati. In regime ordinario simili operazioni sono molto rare e legate a un'attenta regia pubblica. Eventi sismici come quello aquilano possono tuttavia costituire un'occasione importante per giungere a interventi più economici e più sicuri (OPCM 3820/2009). Purtroppo anche in questi casi la difficoltà di metter insieme più proprietari può prevalere. Può essere allora interessante indagare le conseguenze che interventi parziali possono avere sulla prestazione sismica dell'aggregato. Tale indagine è sviluppata su un isolato di Prata, che è stato possibile rilevare per intero, seppure in maniera speditiva, nell'ambito delle attività di redazione dei Piani di Ricostruzione.



Figura 1. Area omogenea 9. Rilievo dell'aggregato di Prata di Lucoli (AQ) esaminato.

2. Descrizione dell'aggregato

Lucoli è caratterizzata da un insediamento diffuso, lungo circa 9 km della valle del torrente Rio. Le sedici frazioni si trovano a un'altitudine compresa fra 800 e 1400 m circa. Tale singolare modalità insediativa risale sino alle *villae* di epoca romana, consolidate in epoca longobarda per garantire la salvaguardia delle terre comuni del *pagus* [2].

L'aggregato in esame si trova nella frazione di Prata (Figura 1), è costruito su un lieve pendio ed è caratterizzato da schiere e pseudoschiere, alcune delle quali rifuse per realizzare un

edificio in linea e un palazzetto. Attualmente la struttura proprietaria si presenta molto frammentata (Figura 2a). L'indagine su planimetrie catastali mostra che almeno fino alla fine del XIX secolo l'isolato aveva dimensione più ampia, estendendosi oltre l'attuale via di San Giorgio. L'aggregato è oggi lungo circa 41 m, largo 32 m e presenta altezza massima di 12 m, in corrispondenza dei tre livelli del palazzetto.

Le coperture sono prevalentemente a capanna (Figura 2b), su orditura primaria di arcarecci. Gli orizzontamenti a copertura dei locali cantinati sono realizzati con volte a botte, anche se diversi presentano attualmente solai a putrelle e tavelloni. Ai piani superiori quasi tutti gli orizzontamenti sono realizzati con solai analoghi o a putrelle e voltine. La muratura è costituita da elementi calcarei non squadri di dimensioni medie e piccole, tipica nell'aquilano. Gli spessori murari del piano terra sono mediamente pari a 74 cm, e oscillano fra 40 e 90 cm. Le altezze di piano oscillano fra 2.5 e 3.2 m. Nell'aggregato è possibile riconoscere diversi presidi di rinforzo: tiranti con capochiave a paletto o più recenti con capochiave a putrella. Demolizioni precedenti hanno invece lasciato la propria traccia sotto forma di speroni.



Figura 2. a) Suddivisione proprietaria al piano terra. b) Assonometria da via di San Giorgio.



Figura 3. Danni osservati: a) Danni verso via San Giorgio; b) Crollo di tavelloni di solaio. Per la posizione dei punti di vista vedi Figura .

L'isolato esaminato ha subito danneggiamenti piuttosto severi. Gli edifici su via San Giorgio hanno subito crolli importanti, quasi sistematici nelle strutture di copertura. È verosimile che fenomeni di abbandono, con conseguente carenza di manutenzione abbiano contribuito ai

danneggiamenti. Non sono stati osservati meccanismi di tessitura, anche se alcune murature del palazzetto hanno subito fessurazioni nel piano molto diffuse ed estese.

Un meccanismo di ribaltamento evoluto sino al collasso si è verificato verso via San Giorgio (Figura 3b, Figura 2a). L'attivazione di un secondo meccanismo è segnalata dal distacco fra strutture orizzontali e facciata del palazzetto verso la pertinenza (lato Sud). L'innescò del cinematismo ha provocato il crollo di un tavellone (Figura 3b). Un terzo meccanismo, evidenziato dalla fessurazione delle pareti trasversali, si è innescato verso via dei Cicisbei, ma è stato controllato dagli incatenamenti presenti.

3. Modellazione della risposta globale *ante e post operam*

La struttura proprietaria frammentata lascia intuire che in condizioni ordinarie è estremamente difficile riuscire a mettere in atto un intervento unitario. La stessa disciplina prevista dopo il sisma del 2009 per gli aggregati edilizi incontra frequentemente resistenze e quelle che erano pensate dalla normativa come porzioni di interventi unitari (OPCM 3820/2009, art. 7. co. 5), subiscono la pressione di proprietari e tecnici orientati a trasformarle in interventi autonomi.

È evidente che numerosi temi rendono raccomandabile un'analisi, ed eventualmente un intervento, esteso all'intero aggregato: a) interazioni meccaniche fra Unità Edilizie (UE) adiacenti e spinte di volte fra loro sfalsate; b) azioni sismiche che UE intercluse possono scaricare su UE d'angolo o di testata; c) opportunità di evitare indesiderati cedimenti differenziali dovuti ad interventi su singole UE; d) possibilità di "collegare" UE d'angolo o di testata al resto del tessuto, mitigandone la maggiore vulnerabilità rispetto a UE intercluse; e) possibilità di ancorare tiranti in murature di Unità Immobiliari (UI) adiacenti, con murature migliori, ovvero disposte più opportunamente e più spesse; f) possibilità di intervenire sulle due facce di un muro di confine fra due UI per migliorare la connessione trasversale e le caratteristiche meccaniche; g) necessità di evitare fenomeni di martellamento dovuti a rigidità differenti; h) conseguenze di interventi parziali, e/o con modifica di rigidità e resistenze delle murature di elevazione e degli orizzontamenti, sul comportamento di tutte le strutture interagenti; i) minimizzazione della frammentazione degli interventi diretti e della duplicazione delle lavorazioni; l) ordinato svolgimento di tutti gli interventi di riparazione dell'edificio e delle singole unità immobiliari; m) verificarsi di situazioni di pericolo a causa della contemporaneità di lavori. Tuttavia la valutazione della vulnerabilità sismica di unità edilizie in aggregato effettuata in condizioni ordinarie raramente è accompagnata dalla conoscenza del tessuto costruito di appartenenza. Viceversa nel caso in esame l'emergenza sismica ha consentito un rilievo, per quanto speditivo, di tutto l'isolato.

Si procede pertanto a un'analisi non lineare in controllo di spostamento dell'intero aggregato, mediante il codice di calcolo a macroelementi 3DMacro [3]. 3DMacro, è basato sull'impiego di un macro-elemento, con comportamento piano nella versione commerciale, costituito da un quadrilatero articolato. I lati del quadrilatero sono infinitamente rigidi e i suoi vertici, incernierati, sono collegati da molle diagonali e da un insieme discreto di molle (interfaccia), distribuite lungo il perimetro. Queste ultime stabiliscono il legame non lineare con i quadrilateri eventualmente adiacenti o con i supporti. In linea di massima un singolo macro-elemento è già concepito per simulare la risposta di un intero pannello; tuttavia una *mesh* più fitta consente di risolvere le irregolarità generate dal mancato allineamento di aperture e strutture orizzontali. Tutti gli elementi sono organizzati in pareti. Le pareti possono interagire tra loro in corrispondenza delle intersezioni, o mediante orizzontamenti; pertanto il loro assemblaggio assume globalmente comportamento tridimensionale, e consente di modellare adeguatamente gli edifici il cui comportamento strutturale può essere considerato scatolare.

In fase di modellazione sono state effettuate alcune approssimazioni, assumendo tutti gli angoli come retti e rendendo le coperture piane. In presenza di limitate differenze di posizione

di bucatore prossime, le aperture sono state allineate in verticale e orizzontale, evitando così macroelementi molto allungati, che avrebbero reso la soluzione numerica meno robusta. Per il calcolo è stata adottata una muratura a conci sbozzati con paramento di limitato spessore e nucleo interno e un livello di conoscenza limitato.

Sulla base delle precedenti considerazioni, sono stati sviluppati diversi modelli dell'intero isolato. I modelli si differenziano per la rigidità delle strutture orizzontali e l'estensione dell'intervento (Figura 4). Si ipotizza di eseguire iniezioni, modellate, seguendo l'approccio euristico di normativa, raddoppiando resistenze e moduli elastici. Proprio la modifica di rigidità e resistenze rende particolarmente rilevante lo studio dell'influenza di interventi parziali sulla risposta. Il confronto fra i modelli è operato facendo riferimento ai rapporti di normativa capacità/domanda, R/E , secondo quattro combinazioni direzione - verso (vedi assi coordinati in Figura 4a). Per ragioni di sintesi, e tenuto conto che gli interventi sono uniformi a tutti i livelli, si considera la sola distribuzione di forze proporzionale alle masse.

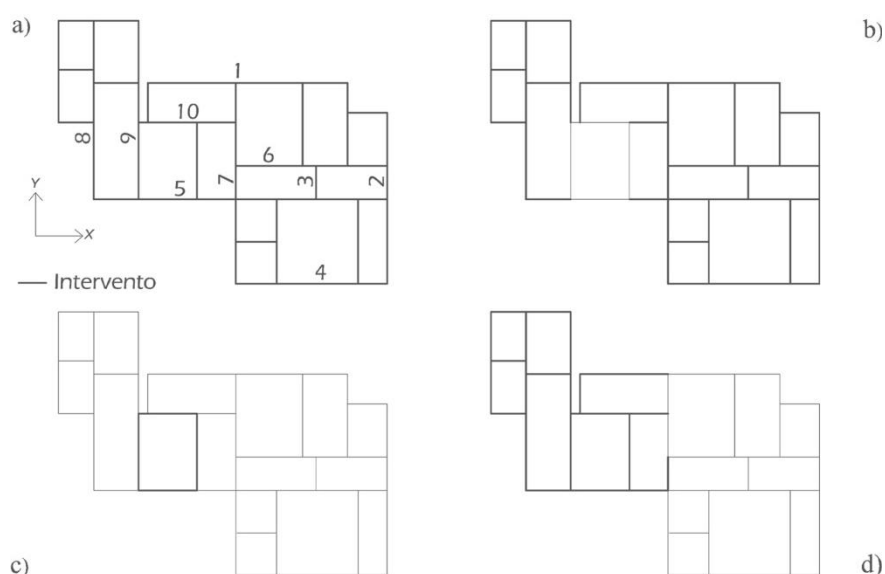


Figura 4. Muri interessati da intervento di rinforzo nei diversi modelli: a) iniezioni su tutto il modello; b) iniezioni su larga parte del modello; c) iniezioni su una singola unità immobiliare; d) iniezioni su una porzione dell'aggregato (circa metà). In a) si riportano la numerazione delle pareti e gli assi coordinati.

3.1 Orizzontamenti infinitamente rigidi

Si analizza innanzitutto il modello con orizzontamenti infinitamente rigidi, poiché la maggior parte dei codici di calcolo commerciali impongono tale vincolo cinematico. Il modello di riferimento è quello nella condizione *ante operam*, che presenta $\min(R/E) = 16\%$, valore registrato nell'analisi +X. Lo scuotimento verificatosi a Lucoli nel 2009 ha certamente superato tale soglia. Trascurando i più severi collassi legati a meccanismi locali (Figura2b, Figura3a) non modellati, i danneggiamenti nel piano dei pannelli murari mostrano un buon accordo sulle pareti 1, 7 e 10 (Figura4a). Tuttavia è da segnalare che il modello con solai infinitamente rigidi mostra un danneggiamento sostanzialmente diffuso e "uniforme".

L'intervento con iniezioni sull'intero modello (Figura4a) comporta un eccezionale miglioramento della prestazione, con $\min(R/E) = 112\%$. Il panorama di danneggiamento è simile a quello *ante operam*, con coinvolgimento diffuso delle pareti alla risposta. In aggiunta, all'interno della singola parete, si assiste a un panorama di danneggiamento diffuso ai diversi livelli (Figura5).

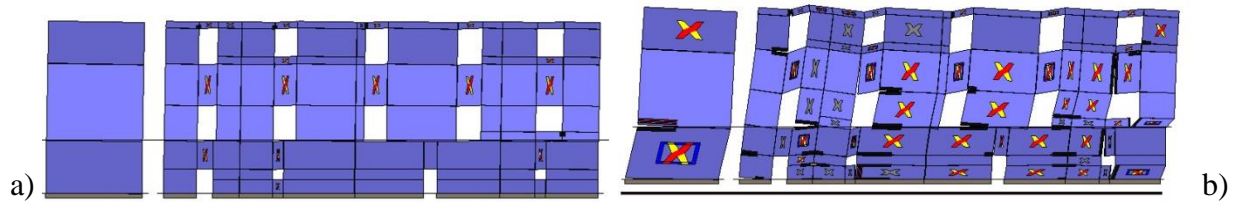


Figura 5. Stato di danneggiamento della Parete 1 al termine dell'analisi al termine dell'analisi +X (orizzontamenti infinitamente rigidi): a) modello *ante operam*; b) iniezioni sull'intero modello (Figura 4a). La linea di base individua i pannelli murari oggetto di intervento.

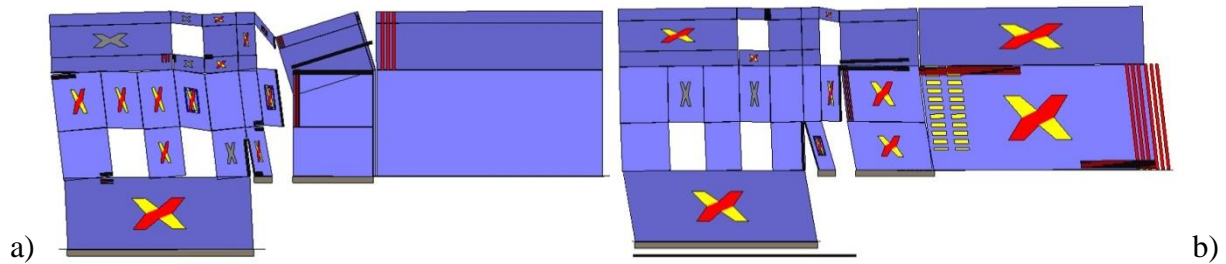


Figura 6. Stato di danneggiamento della Parete 9 al termine dell'analisi +Y (orizzontamenti infinitamente rigidi): a) condizione *ante operam*; b) iniezioni su larga parte del modello (Figura 4b). La linea di base individua i pannelli murari oggetto di intervento.

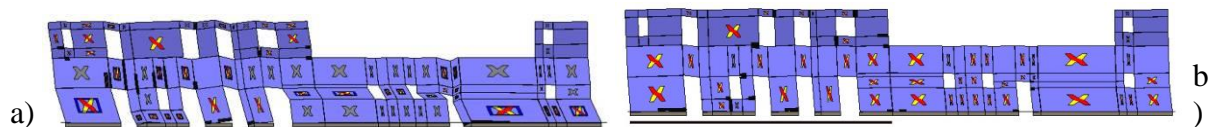


Figura 7. Stato di danneggiamento della Parete 5 al termine dell'analisi -X (orizzontamenti infinitamente rigidi): a) condizione *ante operam*; b) iniezioni su metà del modello (Figura 4d). La linea di base individua i pannelli murari oggetto di intervento.

Il modello con iniezioni estese a tutte le pareti tranne quelle di un'unità immobiliare (Figura 4b) mostra un comportamento complessivo simile al modello con iniezioni su tutte le pareti ($\min(R/E) = 104\%$); il danno migra verso le porzioni prive di intervento (Figura 6). Corrispondentemente il modello con iniezioni su una singola unità immobiliare (Figura 4c) mostra una condizione addirittura peggiore rispetto a quella *ante operam* ($\min(R/E) = 15\%$); non si registrano modificazioni apprezzabili della distribuzione del danneggiamento. Il modello con iniezioni su una singola porzione di intervento (Figura 4d), tipico di pressioni per realizzare piccole associazioni di proprietari, mostra un rapporto capacità/domanda minimo = 19%, di poco superiore a quello *ante operam*. È evidente quindi che strategie di intervento indipendenti, ad esempio iniezioni su una porzione e soli rafforzamenti locali su un'altra, possono portare a esiti complessivamente deludenti. Inoltre anche in questo caso qualche volta si osserva un maggior danneggiamento dove non si è effettuato alcun intervento (Figura 7) e, più spesso, minor danneggiamento a intervento eseguito.

3.2 Orizzontamenti deformabili

Adottando una modellazione con solai infinitamente deformabili il codice di calcolo 3DMacro offre tante curve di spinta quante sono le pareti, proprio perché viene meno il vincolo cinematico di piano. I risultati che si ottengono sono però poco convincenti, poiché anche nel caso di iniezioni su tutte le murature non si ottiene alcun miglioramento sensibile. È stata quindi effettuata una modellazione con orizzontamenti deformabili, peraltro più vicina al comportamento fisico effettivo. Essi sono stati considerati come piastre ortotrope, il cui comportamento è governato da un modulo elastico normale per la risposta fuori piano

(verticale), nonché un modulo elastico normale e uno tangenziale per la risposta nel piano (orizzontale). Nel caso dei solai a governare il primo modulo sono le travi, mentre gli altri due dipendono da tavolato o soletta. Per le volte, presenti in tre sole celle, si è adottata una modellazione a membrana equivalente [4].

Nella condizione *ante operam* si ha un valore minimo del rapporto capacità/domanda pari a 11% (+X), peggiore quindi di quello ottenuto nell'ipotesi di impalcato infinitamente rigidi. Il modello mostra distribuzione del danneggiamento simile al variare della rigidezza dei solai.

L'intervento esteso all'intero aggregato porta a un $\min(R/E) = 119\%$, lievemente più elevato del corrispondente modello con vincolo cinematico di piano. Per la distribuzione del danneggiamento si conferma quanto osservato precedentemente.

Il rapporto capacità/domanda minimo si riduce di poco (111%) per un intervento che coinvolge tutto l'aggregato con l'esclusione di una singola unità immobiliare (Figura 4b). La migrazione del danneggiamento sulle porzioni prive di intervento (Figura 8) è un po' meno marcata di quanto accadeva con gli impalcato rigidi. Si potrebbe quindi concludere che le conseguenze di interventi parziali si propagano a porzioni non consolidate quanto più gli impalcato sono rigidi. L'intervento che coinvolge una sola unità immobiliare (Figura 4c) comporta una prestazione complessiva sostanzialmente coincidente con quella nella condizione *ante operam* (11%). Anche in questo caso, come già in quello con orizzontamenti rigidi, non si registrano modificazioni apprezzabili della distribuzione del danneggiamento. Miglioramento estremamente limitato ($\min(R/E) = 15\%$) si registra per un intervento su una porzione dell'aggregato (Figura 4d), propria di due associazioni di proprietari distinte all'interno di un unico isolato. Si conferma un maggior danneggiamento dove non si è effettuato alcun intervento e un minor danneggiamento a intervento eseguito (Figura 9).

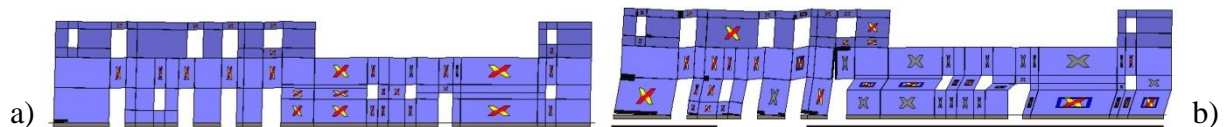


Figura 8. Stato di danneggiamento della Parete 5 al termine dell'analisi +X (orizzontamenti deformabili): a) condizione *ante operam*; b) iniezioni su larga parte del modello (Figura b). La linea di base individua i pannelli murari oggetto di intervento.

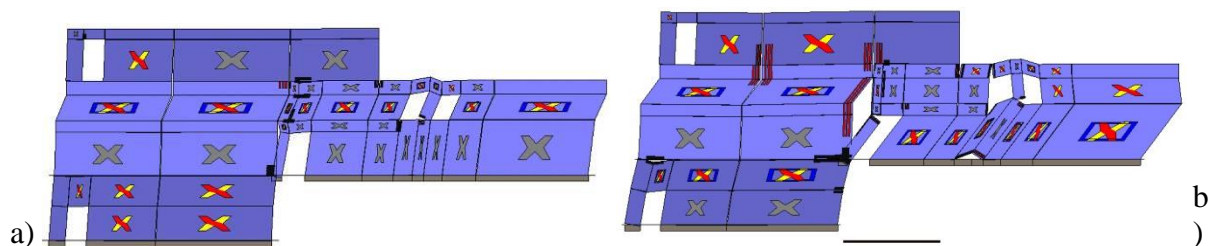


Figura 9. Stato di danneggiamento della Parete 7 al termine dell'analisi -Y (solai deformabili): a) condizione *ante operam*; b) iniezioni su metà del modello (Figura 4d). La linea di base individua i pannelli murari oggetto di intervento.

4. Conclusioni

Gli aggregati edilizi dei centri storici italiani presentano frequentemente un diffuso e marcato danneggiamento in occasione di eventi sismici. Migliorare la loro prestazione è però reso ostico dalla frammentazione della proprietà che in genere comporta frammentazione degli interventi. Può essere allora interessante indagare le conseguenze che interventi parziali possono avere sulla prestazione sismica di un aggregato.

Allo scopo è stato studiato un isolato di Prata di Lucoli (AQ), modellato mediante il codice di calcolo a macroelementi 3DMacro. I modelli sviluppati, che tengono conto della sola risposta

nel piano dei pannelli, si differenziano per la rigidità delle strutture orizzontali e l'estensione dell'intervento.

In termini di stima di vulnerabilità nella condizione *ante operam* si ottengono risultati ragionevolmente coerenti con i danni osservati, anche se il danneggiamento è più diffuso di quanto osservato. Il modello con iniezioni sull'intero tessuto murario mostra un eccezionale miglioramento della prestazione, e un coinvolgimento nella risposta delle pareti ancora più "uniforme". Il modello con iniezioni estese a tutte le pareti tranne quelle di un'unità immobiliare mostra un comportamento complessivo simile al precedente in termini di stima di vulnerabilità; tuttavia il danno migra verso le porzioni prive di intervento. L'intervento su una singola unità immobiliare si dimostra sostanzialmente inefficace e lo stesso accade nel caso di intervento su metà aggregato. È evidente quindi che strategie di intervento indipendenti su porzioni di uno stesso aggregato possono portare a esiti complessivamente deludenti. Ciò è aggravato dal fatto che la separazione delle associazioni di proprietari rischia di render inconsapevoli di una simile problematica e di spostare il danneggiamento dove non si è effettuato alcun intervento.

L'analisi con impalcati deformabili porta a risultati simili. Tuttavia le stime di vulnerabilità sono in genere un po' più severe. Inoltre la migrazione del danneggiamento verso le porzioni prive di intervento sembra essere tanto più marcata quanto più gli impalcati sono rigidi.

5. Ringraziamenti

Gli autori ringraziano il professor Ivo Calì, Università di Catania, per aver gentilmente concesso una copia del codice di calcolo 3DMacro impiegato per le analisi. Questo lavoro è stato condotto nell'ambito dei Piani di Ricostruzione dell'Area Omogenea n. 9 (Lucoli, Ovindoli, Rocca di Cambio, Rocca di Mezzo) e della Convenzione "Dipartimento di Protezione Civile – Consorzio ReLUIS", firmata in data 24 settembre 2009 (repertorio n. 823), Progetto Esecutivo 2009-2012, Area Tematica 1, Linea di Ricerca 1, Task 1.

6. Riferimenti bibliografici

- [1] GALLI, P., CAMASSI, R., (eds) *Rapporto sugli effetti del terremoto aquilano del 6 aprile 2009*, 2009. <http://www.mi.ingv.it/eq/090406/quest.html>
- [2] VIVIO, B. A., *Relazione tecnico-scientifica 4. Relazione storica, allegato al Piano di Ricostruzione di Lucoli*, Roma, Sapienza, 2011.
- [3] CALIÒ, I., MARLETTA, M., PANTÒ, B., "Un semplice macro-elemento per la valutazione della resistenza sismica di edifici in muratura", *XI Congresso Nazionale L'ingegneria Sismica in Italia*, Gennaio 2004, paper H1-09.
- [4] CATTARI, S., RESEMINI, S., LAGOMARSINO, S., "Modelling of vaults as equivalent diaphragms in 3D seismic analysis of masonry buildings", *6th International Conference on Structural Analysis of Historic Construction, Bath, UK, 2-4 July 2008*.