



Analisi di vulnerabilità sismica e interventi di miglioramento strutturale di un aggregato nel centro storico di L'Aquila

Marco Munari, Francesca da Porto, Alice Bartolozzi, Marco Mocellini, Angela Valdesolo, Claudio Modena

Dipartimento di Costruzioni e Trasporti – Università degli Studi di Padova. Via Marzolo 9, 35131 Padova.

Keywords: vulnerabilità sismica, miglioramento strutturale, edifici in aggregato, sisma L'Aquila 2009

ABSTRACT

Nell'ambito delle attività del "Gruppo di Lavoro misto per le attività di valutazione della sicurezza sismica e delle strategie di intervento sul patrimonio murario dei Centri Storici", istituito a seguito del sisma che ha colpito il territorio aquilano il 6 Aprile 2009 da Dipartimento della Protezione Civile, Consorzio ReLUIS e Struttura del Vice-Commissario delegato per la tutela dei Beni Culturali, è stato sviluppato uno studio pilota su un aggregato del centro storico di L'Aquila.

Tale aggregato, individuato ai sensi dell'Ordinanza P.C.M. n. 3820 del 12/11/09, presenta le problematiche e le peculiarità della maggior parte del costruito in muratura del centro storico aquilano: pertanto la metodologia di analisi utilizzata si presta ad essere applicata ad altri aggregati aventi caratteristiche simili, sia a L'Aquila che nei centri storici limitrofi.

Lo studio effettuato si è articolato a partire dal rilievo e dall'analisi delle strutture e delle loro vulnerabilità con lo scopo di redarre il progetto di riparazione e consolidamento sismico. La metodologia elaborata ha costituito la base per la redazione delle "Linee guida per il rilievo, l'analisi ed il progetto di interventi di riparazione e consolidamento sismico di edifici in muratura in aggregato", edite da ReLUIS.

1 INTRODUZIONE

Il sisma del 6 Aprile 2009 è il primo evento che in tempi recenti ha colpito un capoluogo regionale avente un importante centro storico, caratterizzato per sua stessa natura da un'elevata vulnerabilità (Modena et al. 2010).

L'aggregato oggetto di analisi, localizzato all'interno del centro storico, rientra in uno degli ambiti urbani maggiormente colpiti dall'evento sismico, contenente edifici simbolo di L'Aquila: in effetti esso si situa nelle vicinanze della Piazza del Duomo, del Palazzo della Prefettura e delle Chiese di San Marco e Sant'Agostino.

Scopo fondamentale della metodologia di analisi sviluppata è stato la possibilità di utilizzare quest'ultima in modo standardizzato, ovvero rendendola ripetibile in modo metodico con tempi e costi limitati, fornendo utili indicazioni a coloro che non dispongono di

conoscenze approfondite nello specifico ambito del comportamento sismico di edifici esistenti in muratura costruiti in aggregato.

La prima fase conoscitiva, fondamentale per sviluppare le successive analisi, ha previsto un accurato rilievo geometrico, l'analisi storico-critica dei manufatti, al fine di formulare ipotesi sulla formazione ed evoluzione dell'aggregato, e lo studio della morfologia del sito in cui esso è inserito, delle tipologie strutturali e delle tecniche costruttive locali impiegate. Alla fase conoscitiva è seguito il rilievo critico e del danno subito in seguito al sisma, che, correlati con l'analisi delle strutture, hanno fornito importanti informazioni sulla vulnerabilità e sul comportamento globale dell'aggregato. Tutti i dati raccolti hanno costituito la base per lo sviluppo del calcolo strutturale che è stato condotto partendo da una valutazione preliminare della vulnerabilità dell'aggregato, utilizzando la metodologia *Vulnus*, per poi passare allo studio dei meccanismi di collasso locali e d'insieme,

secondo quanto previsto dal D.M. 14/1/2008 “Norme Tecniche per le Costruzioni” (NTC 2008). Infine, per quanto concerne la scelta degli interventi di miglioramento strutturale e la loro quantificazione economica, sempre seguendo le indicazioni emerse dalle precedenti fasi e in collaborazione con la Struttura del Vice-Commissario delegato per la tutela dei Beni Culturali, si sono elaborate delle schede di intervento per ogni tipologia strutturale, collegando il danno o la vulnerabilità particolare al possibile intervento.

La metodologia elaborata ha costituito la base per la redazione delle “Linee guida per il rilievo, l’analisi ed il progetto di interventi di riparazione e consolidamento sismico di edifici in muratura in aggregato”, edite da ReLUIS.

2 LA NORMATIVA VIGENTE E GLI AGGREGATI EDILIZI

Gli edifici esistenti in muratura sono caratterizzati da peculiarità che devono essere opportunamente considerate nell’ambito di verifiche strutturali. In particolare, per impostare nei centri storici, in presenza di edifici complessi, una significativa interpretazione del comportamento meccanico attraverso la modellazione strutturale, è necessaria una specifica conoscenza preliminare, basata su operazioni di rilievo, ricerche storiche ed indagini sperimentali.

La normativa italiana in materia sismica ha formalizzato ed aggiornato di recente questi aspetti. Le (NTC 2008) e, in particolare, le relative “Istruzioni per l’applicazione” (Circ. 617 2009) riportano nel § C8A.3 le istruzioni cui è opportuno attenersi nello studio di aggregati edilizi: tali indicazioni sono riportate schematicamente nel seguito.

Nell’analisi degli edifici di un aggregato edilizio si deve tenere conto delle possibili interazioni derivanti dalla contiguità strutturale con gli edifici adiacenti, connessi o semplicemente accostati. È per questo fondamentale determinare preliminarmente le Unità Strutturali (U.S.) da considerare nello studio, cioè quelle porzioni dell’edificato a cui corrisponde una unitarietà comportamentale (Binda et al. 2004). Si dovrà esaminare l’intero aggregato, individuando le connessioni spaziali fondamentali, con attenzione ai meccanismi di giustapposizione e sovrapposizione, e tenendo conto che tali porzioni di aggregato devono presentare un comportamento strutturale unitario nei confronti di azioni statiche e dinamiche.

A tale scopo, il processo di indagine dovrebbe articolarsi, toccando diversi aspetti informativi ed esaminando:

- i rapporti tra i processi di aggregazione dei tessuti edilizi e l’evoluzione morfologica del sistema urbano ed i principali eventi che hanno influito sugli aspetti tipologici del costruito storico;
- l’allineamento delle pareti, le verifiche di ortogonalità rispetto ai percorsi viari, l’individuazione dei prolungamenti, delle rotazioni, delle intersezioni e degli slittamenti degli assi delle pareti (ciò aiuta ad identificare le pareti in relazione alla loro contemporaneità di costruzione e, quindi, a definire il loro grado di connessione);
- i rapporti spaziali e di regolarità, ripetizione, modularità ai diversi piani delle singole cellule murarie (si possono così distinguere le cellule originarie da quelle dovute a saturazione successiva di spazi interclusi);
- i disassamenti e le rastremazioni delle pareti, i muri poggianti “in falso” sui solai e lo sfalsamento di quota tra solai contigui, che rappresentano indicazioni utili per l’individuazione delle possibili fonti di danno, relative ad azioni statiche e dinamiche, e dei meccanismi di aggregazione;
- la forma e la posizione delle aperture nei muri di prospetto (assialità, simmetria, ripetizione); questo permette di determinare le zone di debolezza nel percorso di trasmissione degli sforzi di compressione e di rilevarne le modificazioni avvenute nel tempo.

Le U.S. vanno comunque individuate in ragione della forma del sistema edilizio cui appartengono e possono essere composte da una o più Unità Immobiliari; in ogni caso, l’U.S. dovrà avere continuità da cielo in terra per quanto riguarda il flusso dei carichi verticali e, di norma, sarà delimitata da spazi aperti, da giunti strutturali o da edifici contigui costruiti, ad esempio, con tipologie strutturali diverse, con materiali diversi o in epoche diverse.

Tra le interazioni strutturali con gli edifici adiacenti, si dovranno considerare le azioni (verticali e orizzontali) provenienti da solai o da pareti di U.S. adiacenti, le spinte non contrastate causate da orizzontamenti sfalsati di quota sulle pareti in comune con le U.S. confinanti, le spinte di archi e volte appartenenti ad U.S. contigue, le spinte provenienti da archi di contrasto o tiranti ancorati su altri edifici, gli effetti locali causati da

prospetti non allineati o da differenze di altezza o di rigidità tra U.S. adiacenti, i possibili martellamenti nei giunti tra U.S. confinanti, le azioni di ribaltamento e di traslazione che interessano le pareti delle U.S. di testata delle tipologie seriali (schiere).

3 FASE CONOSCITIVA

3.1 Rilievo geometrico e ipotesi evolutive

L'aggregato oggetto di analisi, di forma planimetrica piuttosto regolare, risulta essere definito da strade in tutti i suoi fronti, essendo quindi indipendente dagli isolati limitrofi e pertanto analizzabile in modo unitario, separatamente dal resto del contesto (Figura 1). In particolare esso risulta delimitato dalle vie San Francesco di Paola a Sud, degli Alemanni a Nord, Piscignola a Ovest e da Piazza della Repubblica a Est.



Figura 1. Localizzazione dell'aggregato all'interno del centro storico di L'Aquila.

Il lotto descritto, caratterizzato da un dislivello sia in direzione longitudinale che trasversale, risulta per la quasi totalità edificato, presentando solo tre vuoti urbani, costituenti un dettaglio importante per la lettura critica dell'aggregato e per la definizione della vulnerabilità del complesso.

La porzione situata più a Ovest, essendo storicamente e strutturalmente distinta rispetto al resto dell'aggregato (edificio in cemento armato di recente costruzione), viene esclusa dalla presente analisi.

L'attività di rilievo iniziale si è concentrata sul semplice rilievo geometrico degli edifici, essendo il materiale grafico a disposizione molto ridotto, limitato nella maggior parte dei casi alle sole planimetrie catastali: sono stati quindi rilevati tutti gli edifici accessibili, cogliendo i particolari che evidenziano l'impianto originario e, conseguentemente, il sistema di mutazioni che,

per via di aggiunte progressive, ha determinato l'assetto attuale.

A valle del rilievo geometrico, si è proceduto con la suddivisione in unità dell'aggregato oggetto di studio (Figura 3). Inizialmente si sono individuate le Unità di Analisi (U.A., porzioni di aggregato rispetto alle quali è possibile valutare tutti gli eventuali effetti di interazione tra Unità costituenti), grandi unità comprendenti una o più Unità Minime di Intervento (U.M.I., porzione coincidente con la dimensione operativa minima); all'interno di ogni U.M.I. sono state definite le diverse U.S., utilizzate per la definizione degli interventi.

Nello specifico sono state individuate 4 U.A.: l'Unità di Analisi "A" è stata suddivisa in 2 U.M.I. a loro volta ognuna suddivisa in due U.S., considerando le differenze altimetriche, (l'unità 1b ha un piano in meno rispetto alla 1a) e strutturali (l'U.S. 2b è un'autorimessa realizzata con struttura in cemento armato tipo Hennebique strutturalmente differente dall'U.S. 2a realizzata in muratura).



Figura 2. Pianta del livello 0 e Pianta delle coperture dell'aggregato in esame.

L'U.A. "B", essendo un edificio strutturalmente indipendente, coincide con U.M.I. e U.S. n. 3; analogamente, l'U.A. "C" può essere analizzata singolarmente e corrisponde alla U.M.I. e alla U.S. n. 4.

L'U.A. "D" comprende, invece, tutto il blocco di testata prospiciente piazza della Prefettura, coincidente con l'U.M.I. n. 5: essendo tale unità molto ampia e comprendente fabbricati diversi sia per configurazione geometrica sia strutturalmente, si è scelto di suddividerlo in 4 U.S. (5a, 5b, 5c e 5d).

All'interno dell'isolato oggetto di analisi sono presenti tre edifici sottoposti a vincolo (unità 1a, 2a, 5d), caratterizzati da elementi di pregio storico-artistico quali portali monumentali, volte affrescate, imbotti in pietra: la maggior parte delle unità può essere comunque considerata tutelata per interesse storico-artistico.



Figura 3. Planimetria di individuazione di Unità di Analisi, Unità Minime di Intervento e Unità Strutturali.

Vista l'impossibilità di reperire documentazioni storiche dettagliate, le successive ipotesi relative alla formazione dell'aggregato sono basate soprattutto sul rilievo critico di esso.

Dalla Figura 4 e dalla Figura 5 è possibile notare come dai primi edifici isolati costituenti l'aggregato si è passati a fasi successive di saturazione dei vuoti e ad un'ultima fase di sopraelevazione.



Figura 4. Foto storica raffigurante la testata dell'aggregato: è possibile notare come una delle unità abbia subito una sopraelevazione di un piano in epoca relativamente recente.

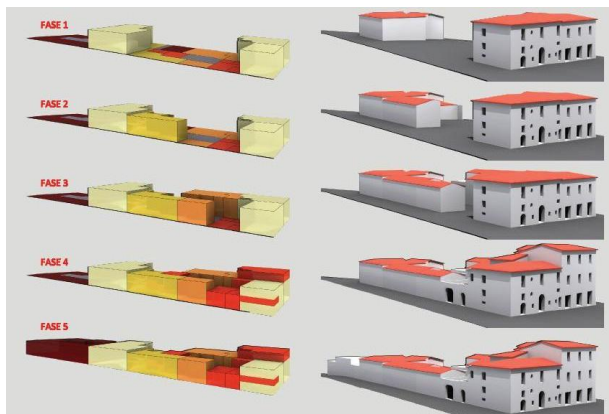


Figura 5. Rappresentazione schematica dell'ipotesi di sviluppo dell'aggregato per fasi successive

È importante sottolineare come la maggiore

vulnerabilità di edifici in muratura che presentano notevole altezza è legata alla snellezza complessiva delle pareti (Figura 6): è quindi importante individuare le altezze relative tra edifici adiacenti, al fine di evidenziare le pareti esposte, non solo sui fronti strada, ma anche all'interno dei volumi edificati.



Figura 6. Individuazione delle sopraelevazioni e delle unità ad un piano.

3.2 Rilievo costruttivo strutturale

Il rilievo è stato condotto osservando gli elementi costruttivi componenti l'aggregato, giungendo al riconoscimento di un lessico locale, con le sue regole e varianti, sia per quanto riguarda le tecniche costruttive, sia per quanto riguarda i materiali utilizzati; inoltre, dall'analisi dei materiali e delle tecniche costruttive, si sono ricavate ulteriori informazioni riguardanti la storia e l'evoluzione dell'aggregato.

Il riconoscimento delle tipologie murarie e la valutazione delle caratteristiche meccaniche delle murature risulta, inoltre, uno degli aspetti fondamentali per la valutazione della sicurezza strutturale di edifici esistenti. Nel caso specifico è

stato possibile distinguere:

- ai piani interrati e ai piani terra murature in pietra calcarea sbazzata e irregolare, con legante di scarsa qualità;
- al primo livello è presente per lo più lo stesso materiale del piano terra, ma con una tessitura molto irregolare e con l'aggiunta di materiali di scarto quali laterizi o pietre di modeste dimensioni;
- dove è presente il secondo livello, questo è in laterizio, segno di sopraelevazione in epoca relativamente recente.

Le indagini visive effettuate saranno successivamente integrate attraverso una campagna di prove in situ per l'effettiva caratterizzazione meccanica delle murature.

Per quanto riguarda gli orizzontamenti, le modifiche avvenute nel tempo hanno portato con molta probabilità alla sostituzione della maggior parte dei solai e delle coperture originarie. Il rilievo visivo, accompagnato da piccoli scassi, ha portato ad una mappatura delle tipologie di orizzontamenti presenti nell'aggregato, consentendo di osservare una certa omogeneità:

- ai piani interrato e ai piani terra sono presenti elementi voltati, solitamente a botte o a padiglione in mattoni disposti di coltello;
- ai livelli superiori gli orizzontamenti sono generalmente leggeri, realizzati con putrelle in ferro e voltine in laterizio o tavelle/tavelloni, questi ultimi di recente inserimento in sostituzione delle voltine o delle tavelle;
- se il livello è l'ultimo praticabile gli orizzontamenti sono spesso costituiti da volte di mattoni disposti in foglio, che hanno dimostrato un'elevata vulnerabilità in occasione dell'evento sismico;
- le coperture sono in legno con diverse orditure, ad eccezione di alcune, ricostruite in laterocemento.

La conoscenza puntuale delle modalità costruttive e della configurazione d'insieme si uniscono, quindi, alle ulteriori informazioni che la lettura evolutiva ha fornito per analizzare gli effetti che il terremoto ha prodotto.

3.3 Rilievo critico del danno

La lettura del danno sismico per l'aggregato risulta importante per la successiva sovrapposizione tra questo e le informazioni raccolte nella fase conoscitiva, potendole così dividere in fattori positivi o negativi nei confronti della vulnerabilità sismica.

Dal rilievo critico è quindi possibile analizzare

quale sia stata la risposta globale dell'aggregato al sisma, evidenziando le cause locali che hanno portato allo stato di danno.

L'aggregato ha manifestato un quadro di danno evidente: è importante sottolineare come il quadro di fessurazioni e crolli rilevato conferma le osservazioni effettuate in occasione di precedenti eventi sismici sul comportamento degli edifici in aggregato soggetti ad azione sismica.



Figura 7. Rilievo dello stato di danno riportato da alcune porzioni dell'aggregato in esame.

Come indicato in Figura 7, in direzione longitudinale (direzione Est-Ovest) le pareti, pur avendo subito lievi ribaltamenti fuori piano dovuti ad effetti locali, hanno manifestato un comportamento attiguo a quello di pannelli murari soggetti ad azioni taglianti, sia a livello di maschi murari che di fasce di piano: sono riscontrabili, infatti, le classiche lesioni a taglio lungo tutti i prospetti.

Si nota come gli edifici di minor altezza e maggiormente vincolati, poiché interni all'aggregato, risultano essere i meno compromessi; al contrario, edifici che presentano un lato libero o di maggior altezza rispetto alle adiacenze, essendo più vulnerabili, hanno subito danni più ingenti.



Figura 8. Ribaltamento della parete libera in direzione trasversale dell'Unità 5a.

Anche nel caso del comportamento in direzione trasversale è evidente come l'aggregato si sia comportato in modo unitario, ponendo in evidenza le vulnerabilità dovute a pareti libere ai due estremi dell'isolato, che hanno subito i danni

maggiori dovuti al ribaltamento fuori piano della facciata (Figura 8).

Esempio emblematico è l'unico crollo di un pannello murario presente nell'aggregato, a livello del secondo piano della porzione prospiciente Piazza della Prefettura: esso corrisponde ad una superfetazione rispetto alla struttura originaria, non vincolata a quest'ultima e quindi più vulnerabile all'azione sismica fuori piano (Figura 9).



Figura 9. Ribaltamento della facciata prospiciente Piazza della Prefettura (Unità 5a).

In merito agli orizzontamenti, sono stati riscontrati diversi livelli di danno a seconda delle diverse tipologie: le strutture al piano terra, composte, come sopracitato, per la maggior parte da elementi voltati in spessore, non hanno subito danni ingenti, presentando solamente lievi lesioni riconducibili più al ribaltamento degli elementi verticali che a un vero e proprio cedimento delle volte stesse.

Il danno più evidente si è manifestato nei solai ai piani alti, con sfilamento delle putrelle o perdita di tavelle-tavelloni, conseguenti all'innescio del ribaltamento della parete.

Caso particolare è costituito dalle volte in foglio, le strutture maggiormente danneggiate: questo è dovuto al fatto che esse, avendo un appoggio minimo sulle pareti perimetrali, sono risultate vulnerabili ai più piccoli movimenti degli elementi portanti, causa del loro crollo totale o parziale (Figura 10).



Figura 10. Esempio di crollo di volta in foglio.

Importante porre l'attenzione su alcuni interventi di modifica rispetto all'assetto

originario, sia strutturali che non strutturali, causa di situazioni locali di elevata vulnerabilità e spesso dell'attivarsi di alcuni meccanismi di danno (Figura 11).

Questi interventi riguardano sia ristrutturazioni mal realizzate, sia modifiche architettoniche eseguite, in mancanza di progettazione, dagli stessi utenti, per soddisfare le proprie esigenze abitative senza cura della struttura.

Nel primo caso interventi diffusi come l'inserimento di cordoli in c.a. e la sostituzione di copertura lignee con coperture in laterocemento, hanno portato all'aumento della massa soggetta all'azione del sisma e causato la variazione della rigidità della struttura.



a)



b)

Figura 11. Realizzazione di interventi non appropriati: a) inserimento di cordolo in c.a.; b) apertura indiscriminata di nicchie, porte e canna fumaria.

Nel secondo caso, l'apertura di nicchie, nuove porte o finestre e canne fumarie, ha indebolito lo schema strutturale resistente originario, incidendo ulteriormente sul comportamento locale.

4 FASE DI CALCOLO

Dalle cognizioni acquisite dalla prima fase conoscitiva, si deve quindi partire per la progettazione degli interventi, la quale non può prescindere dal calcolo.

Vista la complessità caratterizzante gli edifici in aggregato, di fondamentale importanza risulta l'utilizzo di metodi semplificati.

In effetti le Istruzioni per l'applicazione delle (NTC 2008) indicano che “l’analisi di una U.S. secondo i metodi utilizzati normalmente per edifici isolati, senza adeguata modellazione dell’interazione con i corpi di fabbrica contigui, assume un significato convenzionale: di conseguenza, si ammette che l’analisi della capacità sismica globale delle U.S. possa essere verificata attraverso metodologie semplificate. Sono inoltre obbligatorie le verifiche dei meccanismi locali significativi”.

L’analisi è stata pertanto condotta partendo da una prima valutazione globale della vulnerabilità dell’aggregato, utilizzando il software Vulnus.

Quindi si sono svolte analisi e verifiche, sia per quanto riguarda i meccanismi fuori dal piano per ribaltamento di intere pareti o parte di esse (eseguiti per la totalità delle pareti considerando i meccanismi significativi), sia per quanto riguarda il comportamento d’insieme dei setti murari (a taglio e pressoflessione nel piano).

4.1 Analisi di vulnerabilità: la metodologia Vulnus

La metodologia Vulnus (Bernardini et al. 1989), elaborando i dati ottenuti dal rilievo di un campione di edifici, isolati o inseriti in nuclei complessi interagenti, valuta il livello critico di accelerazione orizzontale media corrispondente all’attivazione di meccanismi di collasso nel piano di due sistemi di pareti parallele o quasi parallele (indice I1) e fuori del piano delle singole pareti vincolate dalle pareti ortogonali, dai solai e da eventuali catene o cordoli (indice I2). Il programma, impostati i livelli di accelerazione previsti dalla normativa, restituisce i valori dei due indici che consentono un’analisi preliminare di vulnerabilità sismica. L’applicazione della versione più recente della procedura Vulnus (<http://www.stru.polimi.it:8180/>) consente poi di approfondire tale analisi, ottenendo un giudizio globale sulla vulnerabilità degli edifici allo studio e dell’insieme degli edifici che li compongono: ai due indici I1 e I2 è affiancato un terzo indice di vulnerabilità (I3) ottenuto a partire dai fattori ricavabili dalla scheda G.N.D.T. di 2° livello per la valutazione della vulnerabilità di edifici in muratura ordinaria. Sulla base della teoria degli insiemi sfuocati, Vulnus consente di ottenere dei giudizi linguistici di vulnerabilità per i singoli edifici e per il gruppo di edifici: sono stati considerati cinque diversi livelli (“molto piccola”, “piccola”, “media”, “grande”, “molto grande”). Infine è possibile calcolare i valori attesi di danno grave, e cioè danno >D2 con riferimento alla scala di intensità macrosismica EMS98 (Grunthal

1988), mediante costruzione delle curve di fragilità (Bernardini 2000).

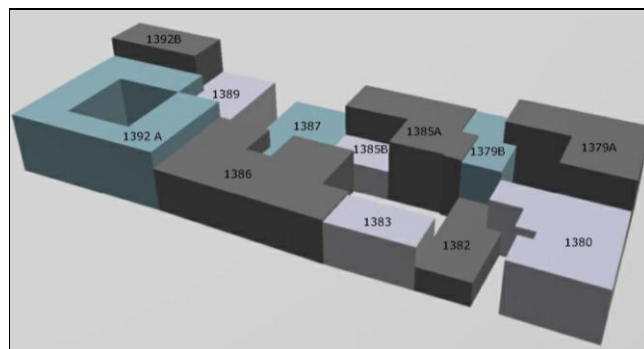


Figura 12. Suddivisione dell’aggregato in unità da sottoporre all’analisi in Vulnus.

L’isolato oggetto di studio è stato suddiviso in 12 unità (Figura 12) che, pur appartenendo a diverse tipologie edilizie, sono caratterizzate da materiali e tecnologie costruttive del tutto simili come descritto in precedenza.

La procedura automatica di Vulnus, una volta calcolati i valori degli indici I1 e I2, permette di svolgere un’analisi statistica dei due indici su tutto il campione di edifici (Valluzzi et al. 2007).

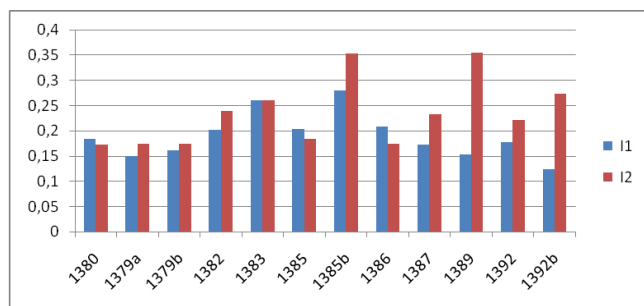


Figura 13. istogramma degli indici I1 e I2 risultanti dall’analisi in Vulnus.

In Figura 13 è evidente come, per la maggior parte degli edifici, l’indice I1 sia minore dell’indice I2, indicando come la vulnerabilità maggiore si verifichi per meccanismi nel piano, a differenza di ciò che generalmente accade per costruzioni storiche in muratura.

Da un’osservazione di carattere generale si nota come gli indici I1 delle diverse unità si mantengano su valori bassi per edifici alti o d’estremità, più esposti a meccanismi di rottura a taglio, mentre a edifici in posizione interna e con minor numero di piani corrispondono valori di I1 superiori a 0,2.

Per quanto riguarda l’indice I2 è possibile riscontrare il medesimo comportamento, con un indice medio di 0,235: gli indici maggiori, corrispondenti alle unità 1385 e 1389, sono dovuti alla presenza di presidi antisismici quali cordoli, che contribuiscono alla riduzione della vulnerabilità della parete alla formazione di meccanismi di rottura fuori piano.

Un’ulteriore procedura utilizzata dal

programma per definire la vulnerabilità consiste nel determinare i valori attesi di danno grave $E[V_g]$ in funzione del rapporto PGA/g tra accelerazione di picco e accelerazione di gravità.

Il programma fornisce dei diagrammi (curve di fragilità), composti da tre curve rappresentanti i limiti inferiore, superiore e i valori centrali, grazie ai quali è possibile stimare il valore atteso di frequenza di danno grave per ogni valore di PGA/g e l'incertezza relativa a tale valore: la zona compresa tra le curve dei limiti inferiore e superiore rappresenta quindi l'intervallo dei più probabili valori di frequenza attesa di danno grave (Munari et al. 2009).

In Figura 14 è riportata la curva di fragilità ottenuta considerando la totalità degli edifici costituenti l'isolato: da questo grafico si ottengono indicazioni relative alla vulnerabilità complessiva, al variare dei tre valori di PGA/g considerati. Anche con questo metodo il risultato finale ha portato ad un giudizio di vulnerabilità molto grande per l'insieme di unità analizzate, con riferimento ai sismi aventi valore di accelerazione più alto.

Si osserva che all'aumentare del rapporto PGA/g cresce il valore di aspettazione di danno $E[V_g]$ e quindi il numero di edifici che saranno soggetti a danno grave.

Le massime intensità macrosismiche rilevate storicamente a L'Aquila (Stucchi et al. 2007) sono state pari a 9 e 8,5 rispettivamente in corrispondenza ai terremoti del 1703 e 2009. Utilizzando la relazione proposta in (Guagenti e Petrini 1989) è possibile ricavare il valore di a/g al sito corrispondenti a tali valori di intensità che equivalgono a 0,19 e 0,14.

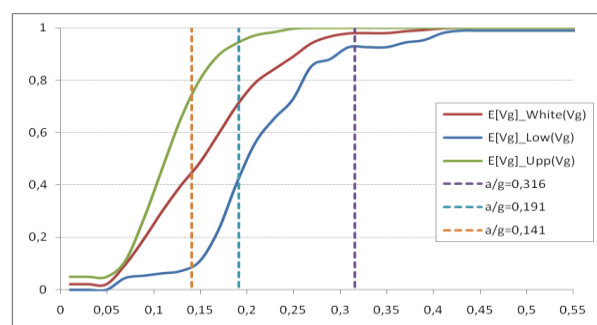


Figura 14. Curve di fragilità

Si può constatare che per valori di accelerazione modesti, il range compreso tra il limite superiore e inferiore è molto ampio e si riduce all'aumentare della PGA/g . Questi dati confermano quanto affermato nella precedente analisi, in cui era già stato individuato un giudizio di vulnerabilità media per $a/g = 0,14$, media/grande per $a/g = 0,19$ e molto grande per $a/g = 0,32$ (valore ottenuto in base ai parametri di pericolosità forniti dalle NTC2008).

4.2 Meccanismi locali di collasso

La verifica dei meccanismi locali di collasso è stata svolta in base alle indicazioni fornite nell'allegato C8A.4 delle "Istruzioni per l'applicazione" delle (NTC 2008), su tutte le pareti di ogni U.S. considerando i meccanismi ritenuti significativi per la costruzione, ipotizzati sulla base del rilievo del danno, che ha individuato il comportamento sismico delle unità dell'aggregato, e delle analisi complessive di vulnerabilità sismica, descritte in precedenza.

Le (NTC 2008) e le relative "Istruzioni per l'applicazione" (Circ. 617 2009), al § C8.7.1.1 riguardante gli edifici esistenti, indicano che la valutazione della sicurezza sismica degli edifici in muratura va eseguita, oltre che con riferimento al comportamento sismico d'insieme, anche con riferimento all'analisi dei meccanismi locali di collasso. "Quando la costruzione non manifesta un chiaro comportamento d'insieme, ma piuttosto tende a reagire al sisma come un insieme di sottosistemi (meccanismi locali), la verifica su un modello globale non ha rispondenza rispetto al suo effettivo comportamento sismico. Particolarmente frequente è il caso delle grandi chiese o di edifici estesi e di geometria complessa [...]. In tali casi la verifica globale può essere effettuata attraverso un insieme esaustivo di verifiche locali."

L'estensione della verifica dei meccanismi locali di ribaltamento fuori piano di tutti i macroelementi della costruzione consente, oltre alla definizione del livello di sicurezza della struttura, ha permesso di progettare i necessari presidi antisismici, quali tiranti e/o cordoli, atti a inibire i meccanismi considerati e garantire il comportamento scatolare d'insieme.

4.3 Meccanismi d'insieme: verifiche nel piano

Le verifiche di resistenza nel piano sono state condotte seguendo le indicazioni delle (NTC 2008) secondo le quali, nel caso di edifici in aggregati edilizi, è possibile riferirsi a modelli semplificati di verifica dei setti murari: qualora gli orizzontamenti siano flessibili è possibile riferirsi ad una modellazione piana e procedere all'analisi delle singole pareti (o al più di sistemi di pareti complanari efficacemente collegate), ciascuna analizzata come struttura indipendente, soggetta ai carichi verticali di competenza ed all'azione del sisma nella direzione parallela alla parete; nel caso di orizzontamenti sufficientemente rigidi, la verifica può essere svolta, anche per edifici con più di due piani, mediante l'analisi statica non lineare analizzando separatamente ciascun interpiano dell'edificio, e

trascurando la variazione della forza assiale nei maschi murari dovuta all'effetto dell'azione sismica.

Le verifiche a taglio e pressoflessione dei setti murari nel piano sono state quindi condotte analizzando singoli sistemi di pareti, cui sono stati applicati i carichi di competenza, mediante analisi statica non lineare, confrontando lo spostamento e la resistenza ultimi di ogni parete con quelli richiesti dalla normativa, definendo così il livello di sicurezza nel piano della struttura e definendo i successivi interventi.

5 PROPOSTE DI INTERVENTO

Le fasi di conoscenza (rilievo geometrico, costruttivo/strutturale e il rilievo critico del danno) unite all'analisi di vulnerabilità e all'analisi dei meccanismi locali di collasso estesa a tutto l'edificio sono la condizione preliminare indispensabile per la definizione degli interventi per il miglioramento sismico.

È stata quindi proposta una valutazione delle principali tecniche di intervento correlate alle vulnerabilità e ai meccanismi ricorrenti riscontrati nelle fasi di analisi dei singoli fabbricati, suddivisi per tipologia strutturale: sono state realizzate delle schede di intervento che correlano le caratteristiche strutturali e il danno rilevato con l'intervento proposto. La caratteristica principale di queste schede è la loro generalità, che le rende utilizzabili anche in interventi su altri fabbricati.

Successivamente a questa fase generale d'individuazione degli interventi, questi sono stati applicati nello specifico al fabbricato oggetto di analisi, per il quale sono stati adattati e progettati. È stata quindi svolta una fase iniziale qualitativa di scelta dell'intervento che, però, non ha sostituito l'analisi quantitativa di progettazione e di definizione dell'incremento di resistenza e di miglioramento sismico.

La scelta delle tecniche d'intervento è stata pertanto valutata caso per caso, dando la preferenza a quelle meno invasive e maggiormente compatibili con i criteri della conservazione, tenendo conto dei requisiti di sicurezza e durabilità. Come indicato in normativa, si sono privilegiati gli interventi in grado di trasformare in modo non permanente l'edificio.

Gli interventi sono stati scelti in modo da rispettare, per quanto possibile, la concezione e le tecniche originarie della struttura, nonché le trasformazioni significative avvenute nel corso della storia del manufatto. Da questo punto di vista si è scelto, quando possibile, di riparare gli

elementi strutturali danneggiati piuttosto che sostituirli (Giuffré 1993).

Gli interventi prospettati per ciascuna patologia o forma di vulnerabilità sono generalmente più d'uno, con caratteristiche diverse in termini di efficacia, invasività, reversibilità, compatibilità, durabilità e costi.

Caratteristica fondamentale per garantire un buon comportamento all'azione sismica degli edifici esistenti in muratura è il comportamento scatolare di quest'ultima: è importante in questa fase garantire la fattibilità degli interventi mirati ad assicurare alla costruzione un soddisfacente comportamento d'assieme, mediante la realizzazione di un buon ammorsamento tra le pareti e di efficaci collegamenti dei solai alle pareti.

Inoltre, si è verificato che le eventuali spinte prodotte da strutture voltate fossero efficacemente contrastate: archi e volte costituiscono infatti un elemento di vulnerabilità, dovuta al loro peso e alla spinta orizzontale che esercitano sulle pareti.

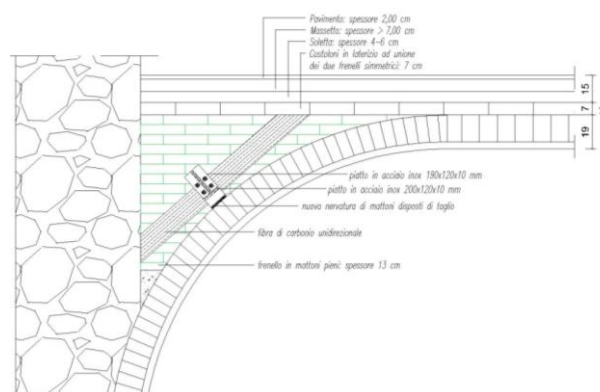


Figura 15. Intervento proposto per il consolidamento di strutture voltate.

Gli interventi sulle strutture ad arco o a volta devono essere realizzati, quindi, con l'obiettivo di compensare le spinte indotte sulle murature di appoggio e di impedirne l'allontanamento reciproco. In particolare, la tecnica di consolidamento proposta a tale scopo (Figura 15) consiste nello svuotamento del riempimento presente e nella realizzazione di una maglia di frenelli in muratura, armati con fibra di carbonio, in modo da alleggerire la spinta della volta e riequilibrare la curva delle pressioni interne distribuendo omogeneamente i carichi e irrigidendo complessivamente il sistema voltato.

Si è considerato opportuno il mantenimento dei tetti in legno, in quanto capaci di limitare le masse nella parte più alta dell'edificio e di garantire un'elasticità simile a quella della compagine muraria sottostante (Giuffré e Carocci 1999).

In generale, vanno il più possibile sviluppati i collegamenti e le connessioni reciproche tra la

parte terminale della muratura e le orditure e gli impalcati del tetto, ricercando le configurazioni e le tecniche compatibili con le diverse culture costruttive locali.

Oltre al collegamento con capochiave metallico, che impedisce la traslazione, si possono realizzare cordoli-tirante in metallo, opportunamente connessi sia alle murature sia alle orditure in legno del tetto (cuffie metalliche), a formare al tempo stesso un elemento di connessione sul bordo superiore delle murature ed un elemento di ripartizione dei carichi concentrati delle orditure del tetto (Figura 16).

Ove i tetti presentino orditure spingenti, come nel caso di puntoni inclinati privi di semicatene in piano, si è previsto di compensarne la spinta.

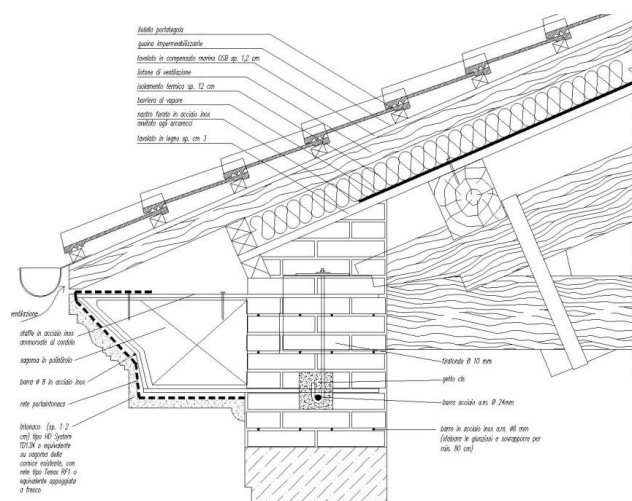


Figura 16. Realizzazione di cordolo in muratura armata nel caso di ricostruzione del cornicione crollato.

6 CONCLUSIONI

Questo lavoro presenta la sintesi dello studio pilota di un aggregato del centro storico di L'Aquila, svolto nell'ambito delle attività del "Gruppo di Lavoro misto per la valutazione della sicurezza sismica e delle strategie di intervento sul patrimonio murario dei Centri Storici" e utilizzato per la redazione delle "Linee guida per il rilievo, l'analisi ed il progetto di interventi di riparazione e consolidamento sismico di edifici in muratura in aggregato" edite da Reluis.

Lo studio ha avuto pertanto lo scopo di fornire gli strumenti per una corretta valutazione del comportamento strutturale globale e locale di edifici in aggregato, attraverso l'identificazione della struttura, l'interpretazione delle cause di danno, l'individuazione delle anomalie e dei problemi strutturali al fine di determinare le più adeguate tecniche di intervento per il ripristino strutturale, che consentano di raggiungere un opportuno grado di miglioramento del comportamento in campo sismico delle strutture.

BIBLIOGRAFIA

- Bernardini, A., Gori, R., Modena, C., 1989. An application of coupled analytical models and experiential knowledge for seismic vulnerability analyses of masonry buildings. In Kortize, A. (ed.), *Engineering aspects of earthquake phenomena*, Omega Scientific, Oxon.
- Bernardini, A. (A cura di), 2000. *La vulnerabilità degli edifici: Valutazione a scala nazionale della vulnerabilità degli edifici ordinari*, C.N.R. – G.N.D.T., Roma.
- Binda, L., Cardani, G., Saisi, A., Modena, C., Valluzzi, M.R., Marchetti, L., 2004. Guidelines for restoration and improvement of historical centres in seismic regions: the Umbria experience. *4th International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions*. 10-13 Novembre 2004, Padova, **II**, 1061-1068.
- Circolare Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti n. 617 del 2/2/2009. Istruzioni per l'applicazione delle "Norme Tecniche per le Costruzioni" di cui al D.M. 14/01/2008. G.U. n. 47 del 26/2/09 suppl. ord. n. 27.
- Decreto Ministeriale del 14/01/08. Norme Tecniche per le Costruzioni (G.U. n. 29 del 4/2/08 suppl. ord. n.30).
- Giuffrè, A., 1993. *Sicurezza e conservazione dei centri storici: il caso Ortigia*. Laterza, Bari.
- Giuffrè, A., Carocci, C., 1999. *Codice di pratica per la sicurezza e la conservazione del centro storico di Palermo*. Laterza, Bari.
- Grunthal, G., 1988. European Macroseismic Scale 1998. *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, **15**, 1-97.
- Guagenti, E. e Petrini, V., 1989. Il caso delle vecchie costruzioni: verso una nuova legge danni-intensità. *4^o Congresso Nazionale ANIDIS 'L'Ingegneria Sismica in Italia'*, Milano, vol. I, pp. 145-153.
- Linee guida per il rilievo, l'analisi ed il progetto di interventi di riparazione e consolidamento sismico di edifici in muratura in aggregato. RelUIS (www.reluis.it), Bozza - Ottobre 2010.
- Modena, C., Casarin, F., da Porto, F., Munari, M., 2010. L'Aquila 6th April 2009 earthquake: emergency and post - emergency activities on cultural heritage buildings. In: Garevski, M., Ansal, A. (ed.), *Earthquake Engineering in Europe*. **17**, 495-521, Springer.
- Munari, M., Valluzzi, M.R., Modena, C., 2009. Classificazioni di vulnerabilità sismica dal calcolo limite per macroelementi: applicazione ad aggregati edilizi in muratura in alcuni centri storici umbri. *13^o Congresso Nazionale ANIDIS 'L'Ingegneria Sismica in Italia'*, 28 Giugno - 2 Luglio, Bologna.
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3820 del 12/11/2009. Ulteriori interventi diretti a fronteggiare gli eventi sismici verificatisi nella regione Abruzzo il giorno 6 Aprile 2009 e altre disposizioni di protezione civile.
- Valluzzi, M.R., Munari, M., Modena, C., Cardani, G., Binda, L., 2007. Analisi di vulnerabilità sismica degli aggregati storici: il caso di Castelluccio di Norcia, *12^o Congresso Nazionale ANIDIS 'L'Ingegneria Sismica in Italia'*, 10-14 Giugno, Pisa.
- Stucchi et al., 2007. DBMI04, il database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI04 (<http://emidius.mi.ingv.it/DBMI04/>). *Quaderni di Geofisica*, **49**, p. 38.