



Valutazione della vulnerabilità sismica degli aggregati in muratura: il caso di Borgo San Rocco a Sora (Italia)

Marco Saccucci^a, Valentina Cima^a, Ernesto Grande^b, Maura Imbimbo^a, Assunta Pelliccio^a

^a Dipartimento di Ingegneria Civile e Meccanica, Università di Cassino e del Lazio Meridionale, Via G. Di Biasio 43, 03043, Cassino (FR), Italia

^b Dipartimento di Ingegneria della Sostenibilità, Università G. Marconi, Via Plinio 44, 00193, Roma, Italia

Keywords: Centri storici, rilievo, meccanismi locali, analisi cinematica, vulnerabilità sismica

ABSTRACT

I centri urbani italiani sono caratterizzati nella maggior parte dei casi da aggregati edilizi in muratura, frutto del risultato di processi non pianificati di sviluppo e dell'assemblaggio di edifici di diverse età, materiali, tecniche di costruzione, dettagli costruttivi. La valutazione della vulnerabilità sismica di tali realtà è, quindi, intrinsecamente connessa alla conoscenza della loro storia costruttiva e delle loro trasformazioni. Infatti, i metodi di analisi per la valutazione della sicurezza sismica, nonché la loro affidabilità, sono strettamente legati al livello di conoscenza.

L'attenzione verso questi sistemi è testimoniata dagli studi disponibili nella letteratura attuale e dalle indicazioni specifiche introdotte nelle recenti versioni della normativa italiana.

Nel presente lavoro viene presentata la valutazione della vulnerabilità sismica di due aggregati edilizi situati nel Borgo San Rocco del comune di Sora attraverso una procedura che mette in evidenza lo stretto legame tra livello di rilievo geometrico/strutturale e metodi di analisi della vulnerabilità sismica.

1 INTRODUZIONE

I recenti eventi sismici che hanno coinvolto i comuni dell'Italia centrale hanno riaperto (riproposto) il dibattito sulla salvaguardia dei centri storici, che per la loro conformazione urbana e unicità sono considerati dei veri e propri monumenti d'ambiente da preservare e tutelare. La maggior parte di essi si trova sulla fascia appenninica, la quale è caratterizzata da un'elevata pericolosità sismica. Inoltre, le continue trasformazioni architettonico/strutturali che hanno riguardato gli edifici che costituiscono gli agglomerati urbani, assieme alla mancanza di un'adeguata manutenzione, costituiscono alcune tra le cause principali di vulnerabilità sismica di tali realtà.

La salvaguardia dei centri storici necessita di un processo di conoscenza accurato e strutturato per evidenziare i fattori principali di vulnerabilità, non legati solamente ad aspetti tecnici, ma ad una molteplicità di fenomeni territoriali, socio-economici, legislativi, etc.

In questo lavoro viene presentata la valutazione della vulnerabilità sismica degli

edifici in aggregato di un borgo dell'Italia centrale eseguita attraverso una procedura che combina esplicitamente i livelli di rilievo geometrico/strutturale con i metodi di analisi sismica. Nel caso specifico, la valutazione della vulnerabilità sismica viene condotta prendendo a riferimento i meccanismi locali di primo modo (Giuffrè 1993), che spesso risultano prevalere nel comportamento sismico degli edifici dei centri storici dal momento che questi ultimi raramente presentano un comportamento di tipo scatolare (Doglioni 2000).

L'attenzione alla vulnerabilità sismica nei confronti dei meccanismi locali per la tutela dei centri storici è già evidenziata da numerosi studi condotti negli ultimi anni fra i quali Valluzzi et al. 2007; Munari et al. 2009; Giuffrè e Carocci 1999; Modena, et al. 2004, ed è confermata dall'introduzione per la prima volta delle verifiche nei confronti dei meccanismi fuori piano per gli edifici in muratura, previste nell'OPCM n. 3274 del 20/03/2003 (OPCM n. 3274 2003), e successivamente nella OPCM n. 3431 del 03/05/2005 (OPCM n. 3431 2005). Le

istruzioni a cui riferirsi per l'analisi dei meccanismi locali sono in seguito state recepite ed integrate dal DM 14/01/2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni" (NTC 2008) e aggiornate dal vigente DM 17/01/2018 "Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»". (NTC 2018) che, in particolare, individua per la valutazione dei meccanismi locali due tipologie di analisi basate sull'approccio cinematico (Circolare NTC 2018 2019): l'analisi cinematica lineare, volta a determinare il moltiplicatore dei carichi che attiva il cinematismo e la corrispondente accelerazione spettrale di attivazione; l'analisi cinematica non lineare, tramite la quale è possibile dedurre la curva di capacità.

L'analisi della vulnerabilità sismica, ed in particolare l'analisi dei meccanismi locali, è strettamente connessa al grado di conoscenza della costruzione investigata che influenza il livello di accuratezza dei modelli, dei metodi utilizzati e dei risultati ottenuti. La conoscenza di un edificio singolo o in aggregato può essere ottenuta tramite differenti tecniche/strumenti di indagine (es. indagini storico-critiche, rilievo architettonico, rilievo strutturale e tecnologico, caratteristiche dei materiali, indagini diagnostiche, etc.). A seconda del livello di dettaglio dei dati acquisiti si possono impiegare metodi di analisi più o meno dettagliati e quindi ottenere differenti livelli di informazione. La scelta del tipo di indagine e di analisi strutturale da svolgere è correlata al grado di attendibilità e all'obiettivo che si vuole raggiungere, oltreché all'impegno economico e temporale da sostenere.

Obiettivo del presente lavoro è di seguire una procedura che coniughi, in modo esplicito, razionale ed efficiente, il livello di conoscenza della costruzione con i differenti metodi di analisi strutturale per la valutazione della sicurezza sismica degli edifici esistenti in muratura, in particolare degli edifici in aggregato caratterizzanti i centri storici.

L'analisi è condotta con riferimento al Borgo San Rocco a Sora (FR) già analizzato in precedenti studi dagli stessi autori (Pelliccio et al. 2017a; Rea et al. 2017; Pelliccio et al. 2017b; Chiumiento et al., 2018) e attualmente inserito come uno dei casi studio nell'ambito del progetto di ricerca "Tecnologie per il miglioramento della Sicurezza la Ricostruzione dei centri Storici in area sismica (SISMI)" del Distretto Tecnologico

per le nuove Tecnologie applicate ai beni e alle attività culturali della Regione Lazio (DTC).

2 ANALISI DI VULNERABILITA' SISMICA

La procedura utilizzata per la valutazione della vulnerabilità sismica si articola su due livelli che mettono in relazione il grado di conoscenza degli edifici investigati (isolati o in aggregato) con i metodi di analisi della vulnerabilità. I due livelli, che si distinguono in base al grado di approfondimento del rilievo geometrico/strutturale (fase di input) e del tipo di informazioni che ne derivano (fase di output), sono caratterizzati come segue:

- *livello qualitativo* (lv1_1) basato su un grado di conoscenza minimo, ovvero su un numero limitato di informazioni, conduce a una definizione della sicurezza sismica meramente di tipo qualitativo;
- *livello quantitativo* (lv1_2) basato su un rilievo di maggiore dettaglio, permette invece una valutazione quantitativa del livello di sicurezza sismica.

Entrambi i livelli sono descritti in dettaglio nel seguente paragrafo, nonché applicati al caso di studio.

2.1 Livello qualitativo – lv1_1

Il livello qualitativo consiste in un approccio semplificato e speditivo per la valutazione qualitativa della vulnerabilità sismica, in termini di individuazione del più probabile meccanismo di collasso, sulla base di informazioni deducibili tramite attività di rilievo speditivo sia in termini geometrici, sia in termini di individuazione del tipo di muratura e, lì dove possibile, di dettagli costruttivi.

Il rilievo, per questo livello di analisi, deve essere in grado di fornire informazioni circa l'individuazione della tipologia architettonica (edificio in linea, a ballatoio, etc.), della tipologia strutturale (struttura portante verticale prevalente come ad esempio muratura, mista, scheletro indipendente, etc.), della tipologia di orizzontamenti (voltati, lignei, latero-cementizi, etc.), dell'evoluzione storica dell'edificio in modo da poter comprendere eventuali stratificazioni tipologiche/strutturali e superfetazioni.

Attraverso l'analisi documentaria per mezzo dell'acquisizione di materiale di archivio (privato, di Stato, Comunale, Ater, etc.) è possibile definire le fasi evolutive e gli interventi trasformativi

dell'edificio nel corso degli anni per eseguire un'analisi storico-critica della costruzione. A tal proposito gli autori indicano quale fonte documentale anche le schede CARTIS per la caratterizzazione tipologico-strutturale dei comparti urbani costituiti da edifici ordinari, che rappresentano uno dei prodotti principali del progetto di ricerca DPC/ReLUIS 2019-2021 WP2 - Inventario delle tipologie strutturali ed edilizie esistenti – CARTIS, promosso dal consorzio ReLUIS e finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile.

Nello specifico, dalle operazioni di rilievo è possibile definire il numero di piani fuori terra, interrati o seminterrati nonché la stima dell'altezza degli interpiani e l'altezza dell'imposta della copertura mediante un esame a vista. Questa analisi richiede anche l'individuazione di eventuali disallineamenti tra gli orizzontamenti contigui, il disallineamento tra le bucatore (porte/finestre) in facciata e la presenza di presidi di rinforzo visibili quali cordoli, catene e tiranti.

A valle di questo tipo di rilievo è possibile, quindi, determinare le Unità Strutturali (US) componenti l'aggregato edilizio, definibili come "una struttura avente continuità ed omogeneità da cielo a terra, così da contenere al suo interno il flusso di tensioni dovute ai carichi verticali". Solitamente sono distinguibili dagli edifici adiacenti in base alla tipologia costruttiva, differenza di altezza, età di costruzione, sfalsamento dei piani, presenza di giunti o discontinuità strutturali e così via (DPC, Manuale AeDES 2009).

Per quanto riguarda le caratteristiche materiche dell'edificio si individua la presenza di intonaci, cortine di mattoni o murature a vista soprattutto in facciata attraverso una indagine visiva. In quest'ultimo caso è possibile acquisire informazioni sulle caratteristiche dell'apparecchio murario.

Lo stato di conservazione dell'edificio viene desunto sulla base del rilievo a vista delle superfici. In applicazione alle Raccomandazioni NorMal 1/88 "Alterazioni macroscopiche dei materiali lapidei: lessico (CNR_ICR 1990, Roma)" possono essere individuate le principali patologie di degrado, naturali e antropiche, definite le principali cause dei fenomeni descritti, e rappresentate per individuarne la consistenza. Allo stesso modo, secondo una simbologia convenzionalmente riconosciuta in Italia, si

individua il quadro fessurativo (in pianta e in alzato) rappresentando le tipologie di dissesto (diffuso, ad angolo, fuori piombo, disconnessione, espulsione materiale, etc).

Infine, attraverso l'interpretazione dei documenti e il rilievo a vista è possibile, almeno localmente, individuare le caratteristiche della muratura sotto intonaco e definire il grado di ammorsamento tra pareti ortogonali, i dispositivi di collegamento e il grado di collegamento solaio-parete.

In sintesi le fasi di rilievo speditivo previste per questo livello di indagine prevedono di individuare:

- le caratteristiche architettoniche (numero di piani fuori terra, stima delle altezze interpiano, altezza dell'imposta di copertura, disallineamento degli orizzontamenti, disallineamento delle bucatore);
- le caratteristiche strutturali (tipologia strutture, qualità muratura, tipologia di orizzontamenti, presenza di presidi di rinforzo, quadro fessurativo, ammorsamento tra pareti ortogonali, collegamento solaio-parete);
- le unità strutturali all'interno dell'aggregato edilizio.

I dati dedotti da questo tipo di rilievo rappresentano i parametri di input per poter identificare il più probabile meccanismo di collasso delle US.

Ciò in particolare è stato fatto nel presente lavoro attraverso una procedura sviluppata dagli autori, tramite la quale è possibile determinare per ogni US la tipologia di meccanismo di collasso atteso sulla base della presenza o mancanza di specifiche caratteristiche strutturali emerse proprio dal rilievo (Pelliccio et al. 2017a; Saccucci 2016). Nello specifico, se dal rilievo si evince l'assenza di un adeguato vincolo in sommità (cordoli, catene) e la mancanza o scarsa efficacia di ammorsamenti con le pareti ortogonali, la procedura restituisce come potenziale meccanismo quello di ribaltamento semplice. Allo stesso modo, se dal rilievo è emersa la mancanza di vincolo in sommità ma la presenza di un'efficace connessione con le pareti trasversali, oltre che eventualmente la presenza di coperture spingenti, di pareti trasversali con aperture in prossimità della connessione e di scadente qualità, l'algoritmo alla base della procedura tende ad evidenziare la possibilità di meccanismi di ribaltamento composto. Nel caso

in cui si rileva che la parete sia libera in sommità ma efficacemente vincolata alle pareti ortogonali, ed inoltre sono presenti spinte in copertura, elementi che indeboliscono la sezione muraria (canne fumarie, aperture disposte in modo da favorire il cinematismo), significative luci libere della parete e cattiva qualità muraria, la procedura restituisce come meccanismo più probabile quello di flessione orizzontale. Infine, se la parete investita dall'azione sismica risulta efficacemente vincolata solo in sommità (ad esempio con cordoli o tiranti) e libera nelle zone intermedie, oltre che eventualmente soggetta a spinte orizzontali localizzate, dovute ad archi o volte, o all'azione di martellamento di un solaio, la procedura fornisce in output il meccanismo di flessione verticale (Beolchini et al. 2007).

2.2 Livello quantitativo – lvl_2

Il livello quantitativo si basa su rilievi strumentali volti ad approfondire la conoscenza della geometria e della presenza di ulteriori dettagli costruttivi, il tutto finalizzato allo sviluppo di modelli da utilizzare per ottenere informazioni di tipo quantitativo sulla vulnerabilità della costruzione, ovvero che consentano di associare ai possibili meccanismi di collasso, individuati attraverso il livello 1, la corrispondente accelerazione spettrale di attivazione (a_0).

A tale riguardo possono essere utilizzate diverse tecniche strumentali per l'esecuzione dei rilievi: laser scanner 3D, strumenti topografici o la tecnica della fotogrammetria digitale aerea con drone e terrestre che consente di creare dei modelli reality-based a partire da immagini fotografiche digitali ad alta risoluzione e applicando dei particolari algoritmi di correlazione delle immagini (Remondino 2011). Con la tecnica fotogrammetrica, oltre ad avere informazioni di carattere alfanumerico, è possibile analizzare eventuali stati di deformazione con la lettura di piani fuori piombo rispetto alla geometria iniziale. È possibile, inoltre, integrare le immagini acquisite con altri tipi di sensori per dettagliare con estrema precisione la geometria e le caratteristiche materiche dell'edificio sia nella scala territoriale che architettonica (Remondino e El-Hakim 2006).

Per eseguire le analisi alla base dell'approccio quantitativo si rende necessaria la caratterizzazione meccanica della muratura. Essa può eseguirsi attraverso prove non distruttive in

sito o prove di laboratorio. Tuttavia le caratteristiche meccaniche possono anche essere ottenute per analogia con le tipologie murarie presenti nella tabella C8.5.I della circolare n. 7 del 2019. Si può, quindi, fare uso dei valori medi di riferimento dei parametri meccanici forniti da tale tabella, eventualmente amplificati con i coefficienti della tabella C8.5.II.

In sintesi le fasi di rilievo previste per questo livello di indagine, dettagliato e strumentale, prevedono l'individuazione delle:

- caratteristiche architettoniche (geometria e misura dei singoli elementi e dei dettagli architettonici);
- caratteristiche strutturali (proprietà meccaniche dei materiali, dettagli costruttivi).

Dal punto di vista dei metodi di analisi strutturale invece, si ricorre all'analisi cinematica lineare e non lineare per valutare il livello di sicurezza sismico. A tale riguardo, sono infatti numerosi gli autori che hanno proposto da tempo di ricorrere a tale tipologia di analisi (Giuffrè 1993; Gurrieri et al. 1999), così come le normative e linee guida ne promuovono e definiscono in dettaglio la loro applicazione (MiBAC 2010).

Confrontando i due approcci si osserva chiaramente che, nel caso in cui non sia possibile reperire documentazione d'archivio o altre fonti da cui desumere i dati geometrici-costruttivi per l'applicazione del livello qualitativo, risulta indispensabile approfondire il grado di conoscenza della costruzione attraverso attività di rilievo strumentale, ovvero passare direttamente ad un livello quantitativo di analisi. Inoltre, se dal livello qualitativo non si riscontrano criticità può essere non necessario proseguire con le analisi quantitative. Si sottolinea, infine, che il livello quantitativo è più oneroso in termini di tempo e di costi rispetto a quello qualitativo, ma, fornisce informazioni spesso indispensabili per valutare la necessità e il tipo di intervento da eseguire.

3 CASO DI STUDIO: BORGO SAN ROCCO A SORA (FR)

Sora è un comune del centro Italia di 26.985 abitanti ubicato nella provincia di Frosinone. È la quarta città della provincia per il numero di abitanti. Situata a circa 300 m s.l.m., è a ridosso dell'Appennino Centrale, al confine tra Lazio ed Abruzzo ed alla confluenza della Valle Roveto

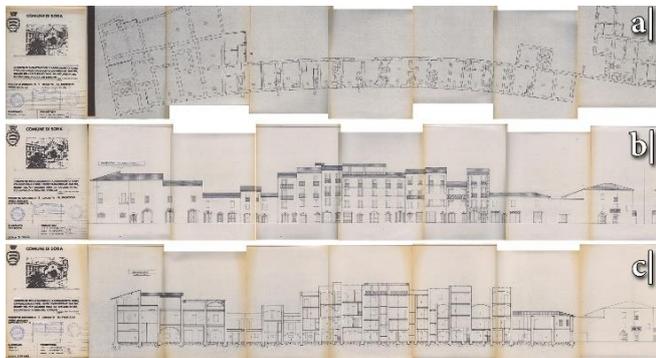


Figura 3. Documentazione di archivio: “Interventi di riattazione e adeguamento igienico-funzionale degli edifici danneggiati dai terremoti del 7 e 11 maggio 1984 da attuare in modo unitario a cura del comune”: a) planimetria piano terra; b) prospetto di un comparto; c) sezione (Comune di Sora).

In particolare, il borgo assume la conformazione attuale nella prima metà del XVI secolo. La zona è connotata dalla cosiddetta Porta San Rocco, conosciuta come l’Arco di San Rocco. Con il passare del tempo la presenza di questo elemento ha assunto un carattere distintivo per l’intera area visto che, oltre di esso, si apre la stretta strada che conduce alla chiesa di San Rocco. La via è fiancheggiata da densi nuclei abitativi che costituiscono due aggregati strutturali denominati Comparto A e Comparto B composti da 39 US, di cui 30 prospicienti la strada. Essi generano uno *street canyon*, con edifici che hanno un’altezza variabile tra due e cinque piani fuori terra caratterizzati da una tipologia costruttiva in muratura portante (Figura 4).

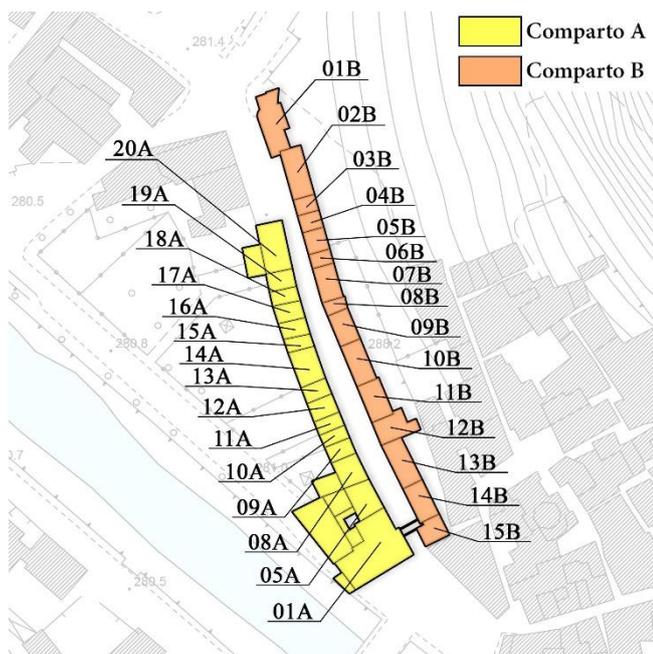


Figura 4. Individuazione delle US ed attribuzione del codice identificativo (M. Saccucci).

Nel corso del tempo, il Borgo di San Rocco è stato oggetto di diversi interventi di ristrutturazione edilizia, di cui uno dei più recenti e significativi risale al post sisma del 1984 che interessò l’Italia centro-meridionale. In occasione di tale evento furono sostituiti gli orizzontamenti che avevano subito dei danni considerevoli e furono, in alcuni casi, inserite delle tirantature metalliche al fine di migliorare il comportamento scatolare degli edifici.

Nonostante la totalità delle US presenti una struttura portante verticale in muratura, si osserva una vasta eterogeneità di orizzontamenti. Alcuni di essi conservano ancora solai lignei con travi di castagno a sezione circolare e valere regolari. Ulteriori tipologie come solai latero-cementizi gettati in opera, con putrelle e tavelloni e superfici voltate a botte caratterizzano le unità del borgo. Per quanto riguarda le chiusure orizzontali di copertura, esse sono tutte realizzate in legno a semplice orditura di falsi puntoni sormontati da un tavolato posto come base per i coppi. In particolare, nelle estremità delle due mega cortine che costituiscono il borgo, i tetti hanno conformazione a padiglione, mentre nella zona centrale sono a capanna oppure a falda unica.

Dai dati di rilievo si denota che i componenti murari verticali hanno uno spessore variabile per i piani terra da un massimo di 70 cm ad un minimo di 50 cm con riseghe strutturali ai piani superiori dell’ordine del 15%. Gli apparecchi murari sono generalmente ad opera incerta in pietra calcarea, con un adeguato rapporto malta/materiale lapideo.

Sulla base della tradizione costruttiva locale e della stratigrafia del terreno, le fondazioni si ipotizzano del tipo superficiali.

Gli elementi di collegamento verticale si trovano in posizione longitudinale in tutte le unità.

I dati dedotti tramite un rilievo documentale e a vista (ovvero relativo al livello qualitativo), sono stati impiegati per definire il meccanismo di collasso che ha maggiore probabilità di verificarsi in caso di evento sismico per ciascuna US costituente il borgo. I meccanismi emersi introducendo i dati del rilievo qualitativo all’interno della procedura per la determinazione dei più probabili meccanismi di collasso fuori piano sono riportati in Figura 5.

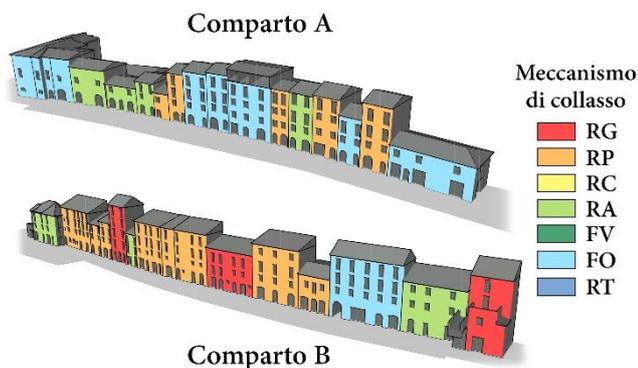


Figura 5. Approccio qualitativo – Meccanismi individuati per le US, in cui si è indicato con: *RG* il meccanismo di ribaltamento semplice globale, *RP* il meccanismo di ribaltamento semplice parziale, *RC* il meccanismo di ribaltamento del cantonale, *RA* il meccanismo di ribaltamento lungo le aperture, *FV* il meccanismo di flessione verticale, *FO* il meccanismo di flessione orizzontale e *RT* il meccanismo di ribaltamento del timpano (M. Saccucci).

3.2 Livello quantitativo

L'analisi a tale livello ha richiesto dunque di approfondire l'analisi del rilievo. A tal fine, è stato eseguito un rilievo aereo fotogrammetrico digitale. Tale rilievo è stato ottenuto, infatti, grazie ad una elaborazione fotogrammetrica digitale di fotogrammi acquisiti con drone: in particolare, è stato utilizzato il drone DJI Phantom 3 Advanced con camera da 12 Mpixels montata su gimbal a 3 assi. È stata dunque ottenuta, a mezzo dell'elaborazione delle immagini, una nuvola di punti metricamente corretta (errore di circa 1%) e facilmente navigabile e interrogabile geometricamente attraverso una serie di tool interni al software per il management della nuvola (Figura 6). In particolare si possono misurare le distanze, definire l'ortogonalità dei piani nel modello etc.



Figura 6. Interrogazione della *dense cloud point* ottenuta dal rilievo fotogrammetrico digitale aereo (M. Saccucci).

Per ciascuna US è stato assunto che le pareti manifestino un comportamento monolitico per azioni fuori dal piano. Si è quindi proceduto

all'analisi cinematica lineare dei meccanismi individuati alla luce dell'approccio qualitativo.

A valle delle informazioni di maggiore dettaglio ottenute dalla fase di rilievo, si è passati alla fase dell'analisi della vulnerabilità sismica andando a calcolare i moltiplicatori di collasso α_0 e le corrispondenti accelerazioni spettrali di attivazione a_0 [g] (Figura 7). È stata poi determinata l'accelerazione al suolo che attiva il meccanismo $a_{g,SLV}$ nell'ipotesi che la porzione di costruzione interessata dal meccanismo si comporti come infinitamente rigida fino alla sua attivazione e considerando un fattore di struttura q pari a 2.

Infine, si è eseguita la verifica semplificata con fattore di struttura q allo SLV verificando che la capacità sia maggiore della domanda. A tal fine si è considerata come capacità l'accelerazione al suolo che attiva il meccanismo $a_{g,SLV}$ e come domanda l'accelerazione di riferimento al suolo a_g valutata con riferimento alla probabilità di superamento dello SLV nella vita di riferimento (Figure 8 e 9).

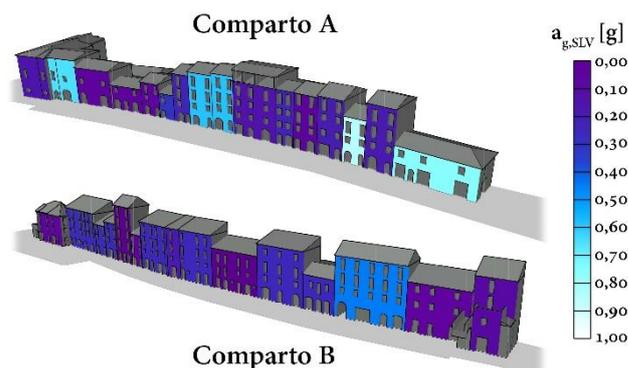


Figura 7. Risultati dell'analisi cinematica lineare in termini di accelerazione spettrale di attivazione del meccanismo a_0 (M. Saccucci).

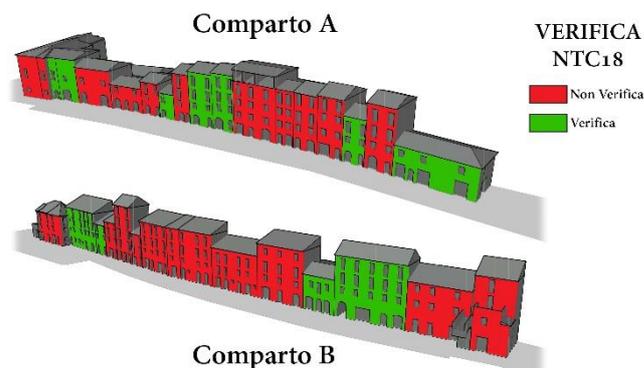


Figura 8. Risultati della verifica semplificata con fattore di struttura q allo SLV (M. Saccucci).

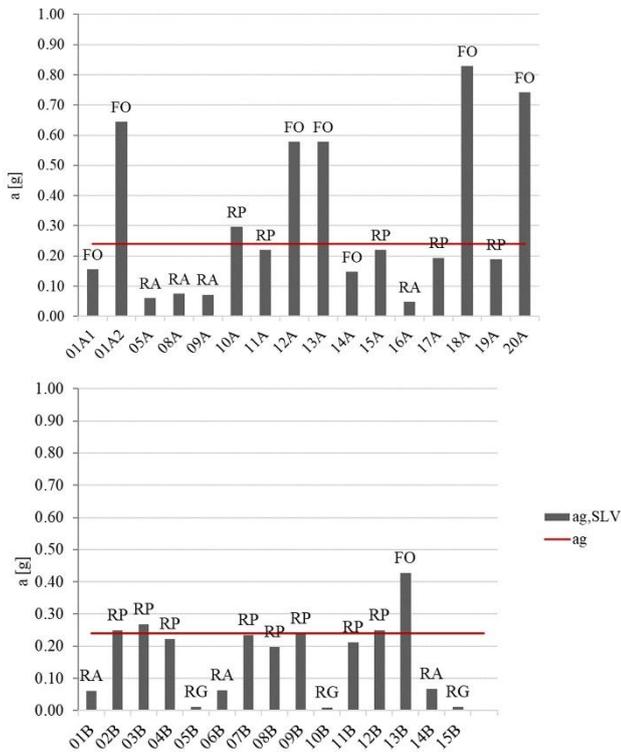


Figura 9. Confronto fra capacità e domanda: a| comparto A, b| comparto B (V. Cima).

A titolo di esempio si riportata la schematizzazione e i dati di input necessari per l'analisi cinematica lineare della facciata a tre piani appartenente all'US 10B (Figura 10a), per la quale, alla luce dell'analisi qualitativa è stato individuato un meccanismo di ribaltamento semplice attorno alla cerniera situata alla base della parete.

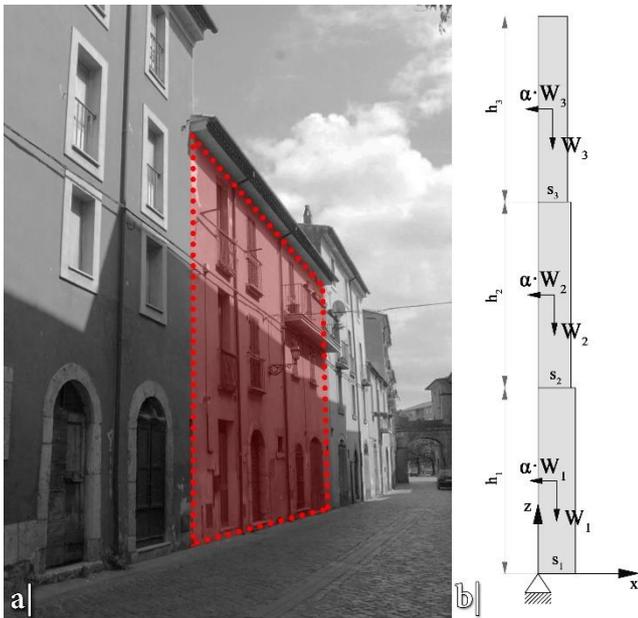


Figura 10. Edificio 10B: a) foto della facciata; b) schema della parete per il meccanismo di ribaltamento globale (M. Saccucci).

Dato che nell'edificio esaminato la copertura e i solai di tutti i livelli sono orditi parallelamente alla facciata, mentre risultano assenti archi, volte

e tiranti, si è fatto riferimento allo schema riportato in Figura 10|b, dove sono stati indicati con:

- W_1, W_2, W_3 i pesi propri rispettivamente delle pareti dei piani 1, 2 e 3;
- α il moltiplicatore delle forze orizzontali;
- h_1, h_2 e h_3 le altezze interpiano rispettivamente ai piani 1, 2 e 3;
- s_1, s_2 e s_3 lo spessore rispettivamente delle pareti dei piani 1, 2 e 3.

4 CONCLUSIONI

La valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici esistenti in muratura in Italia è di estremo interesse, in particolare per le costruzioni dei centri storici, generalmente disposte in aggregati. Tali edifici risultano spesso il frutto di complesse stratificazioni e modifiche nel tempo che richiedono un'indagine conoscitiva il cui livello di approfondimento può fortemente influenzare l'applicabilità e l'attendibilità dei metodi di analisi strutturale.

Il presente lavoro ha avuto come obiettivo principale l'applicazione di una procedura multi-livello che evidenzia in modo esplicito il legame tra metodi/tecniche di rilievo e metodi di analisi strutturale per la valutazione della sicurezza sismica di edifici in muratura in aggregato.

Infatti, i due livelli applicati, ovvero quello qualitativo e quello quantitativo, hanno evidenziato come sia possibile giungere a differenti gradi di informazione riguardanti la sicurezza sismica sulla base di diverse tecniche di rilievo.

Inoltre, dal lavoro è emersa la possibilità di utilizzare le informazioni contenute in database che sintetizzano le caratteristiche tipologico-strutturali dell'edificio, come ad esempio quello che si sta sviluppando nell'ambito del progetto CARTIS del DPC/ReLUI 2019-2021.

Tabella 1. Dati di input per l'analisi cinematica dell'US 10B.

Piano	1	2	3
Spessore macroelemento s [m]	0.75	0.70	0.60
Larghezza della fascia sottofinestra al netto delle aperture [m]	8.19	12.29	10.49
Larghezza della fascia intermedia al netto delle aperture [m]	8.19	10.49	10.49
Larghezza della fascia soprafinestra al netto delle aperture [m]	14.09	14.09	14.09
Altezza della parete (interpiano) h [m]	3.30	3.20	3.50
Braccio orizzontale del carico in testa alla parete d [m]	0.38	0.35	0.30
Braccio orizzontale dell'azione di archi-volte [m]	0.00	0.00	0.00
Quota punto applicazione spinta archi-volte [m]	0.00	0.00	0.00
Quota del baricentro della parete y_{Gi} [m]	1.80	1.67	1.87
Peso specifico della muratura γ [kN/m ³]	16	16	16
Tipologia solaio	LC	LC	LC
Orditura solaio adiacente	//	//	//
Ammorsamento sulle pareti perpendicolari alla facciata	No	No	No
Peso proprio della parete W [kN]	366	420	393
Carico trasmesso dal solaio P_{si} [kN]	0	0	0
Spinta statica trasmessa dalla copertura P_H [kN]	0	0	0
Componente verticale della spinta di archi o volte F_{vi} [kN]	0	0	0
Componente orizzontale della spinta di archi o volte F_{hi} [kN]	0	0	0
Azione del tirante T [kN]	0	0	0

RINGRAZIAMENTI

La ricerca è stata sviluppata nell'ambito dei progetti:

con:

- DPC/ReLUI5 2019-2021 WP2. Inventario delle tipologie strutturali ed edilizie esistenti- CARTIS;
- SISMI (Tecnologie per il miglioramento della Sicurezza e la ricostruzione dei centri Storici in area sisMIca), nell'ambito del Distretto Tecnologico dei Beni Culturali della regione Lazio (DTC Lazio).

RIFERIMENTI

- AA. VV., 2010. Linee guida per il rilievo, l'analisi ed il progetto di interventi di riparazione e consolidamento sismico di edifici in muratura in aggregato. Bozza, Dipartimento della Protezione Civile, ReLUI5.
- Beolchini, G. C., Cherubini, F., Cifani, G., Mannella, A., Martinelli, A., Milano, L., Miozzi, C., 2007. Sisma del 1997 nella Regione Marche: repertorio dei meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei relativi costi negli edifici in muratura. Regione Marche, CNR-ITC, Università degli Studi dell'Aquila. Osimo (AN): Tipografia s.r.l. Grafiche Scarponi.
- Branca, C., 1847. *Memorie storiche della città di Sora*. Sora: Forni.
- Chiumiento, G., Formisano, A., Grande, E., & Pelliccio, A., 2018. A New Simplified Method for Seismic Behaviour Evaluation of Structural Units in Masonry Aggregates. *International Conference on Resilience and Sustainability of Cities in Hazardous Environments*. Naples.
- Circolare NTC 2018, 2019. Circolare n. 7 del 21 Gennaio 2019, "Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»» di cui al DM 17 gennaio 2018". C.S.LL.PP.
- Culturali, M. p., 2010. Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale allineate alle nuove Norme tecniche per le costruzioni (d.m. 14 gennaio 2008).
- D'Ayala, D., & Speranza, E., 2003. Definition of collapse mechanisms and seismic vulnerability of historic masonry buildings. *Earthquake Spectra*, **19**(3), p. 479-509, doi:10.1193/1.1599896.
- Dogliani, F., 2000. Codice di pratica (Linee Guida) per la progettazione degli interventi di riparazione, miglioramento sismico e restauro dei beni architettonici danneggiati dal terremoto umbro-marchigian. (G. Cafoneni, A cura di) Bollettino ufficiatale delle Regione Marche.
- Giuffrè, A., 1993. *Sicurezza e conservazione dei centri storici. Il caso Ortigia*. Bari: Laterza.
- Giuffrè, A., Carocci, C., 1999. *Codice di pratica per la sicurezza e la conservazione del centro storico di Palermo*.
- Gurrieri, F., Blasi, C., Borri, A., Di Pasquale, S., Malesani, P., Nigro, G., Tampone, G., 1999. Manuale per la riabilitazione e la ricostruzione post sismica degli edifici - Regione Umbria. (F. Gurrieri, A cura di) Roma: Edizioni DEI tipografia del Genio Civile.
- Locati, M., Camassi, R., Rovida, A., Ercolani, E., Bernardini, F., Castelli, V., Rocchetti, E., 2016. *Database Macrosismico Italiano (DBMI15)*. Tratto da Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV): <https://doi.org/10.6092/INGV.IT-DBMI15>
- Modena, C., Valluzzi, M., Binda, L., Cardani, G., & Saisi, A., 2004. Vulnerability of historical centres in seismic area: reliability of assessment methods for different building typologies. *Proc. of Int. Conf., (13th Int. Brick/Block Masonry Conf., Rai, Amsterdam, 4-7/7/2004)*, CD-ROM.
- Munari, M., Valluzzi, M., & Modena, C., 2009. Classificazioni di vulnerabilità sismica dal calcolo limite per macroelementi: applicazione ad aggregati edilizi in muratura in alcuni centri storici umbri.
- NTC. Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le Costruzioni" D. M. 17 gennaio 2018.

- OPCM n. 3274. (2003, Marzo 20). Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica. G.U. 8 maggio 2003, n. 105 - S.O. n. 72.
- OPCM n. 3431. (2005, Maggio 3). Ulteriori modifiche ed integrazioni all'O.P.C.M. n. 3274 del 20 marzo 2003, recante «Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica». G.U. 10 maggio 2005, n. 107 - S.O. n. 85.
- Pelliccio, A., Saccucci, M., & Grande, E., 2017. An integrated modeling system (BIM) for a quickly and reliable evaluation of the "interference" for the historical building aggregates: Limit Emergency Condition (CLE). *Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione - Territori e frontiere della rappresentazione*. Napoli: GANGEMI EDITORE.
- Pelliccio, A., Saccucci, M., & Grande, E., 2017. HT_BIM: Parametric modelling for the assessment of risk in historic centers/HT_BIM: La modellazione parametrica per l'analisi del rischio nei centri storici. *DISEGNARECON*, **10**(18), 5-1.
- Rea, P., Pelliccio, A., Ottaviano, E., & Saccucci, M., 2017. The Heritage Management and Preservation Using the Mechatronic Survey. *International Journal of Architectural Heritage*, **11**. doi:10.1080/15583058.2017.1338790
- Remondino, F., 2011. Rilievo e modellazione 3D di siti e architetture complesse. *DISEGNARECON*, **4**(8), 90-98.
- Remondino, F., & El-Hakim, S., 2006. Image-based 3D modelling: a review. *The photogrammetric record*, **21**(115), 269-291.
- Saccucci, M., 2016. Il rilievo degli edifici storici nella CLE: simulazione dei possibili cinematismi di collasso. Il caso di Borgo San Rocco a Sora (FR). *Tesi di Laurea Magistrale*.
- Valluzzi, M., Munari, M., Modena, C., Cardani, G., & Binda, L., 2007. Analisi di vulnerabilità sismica degli aggregati storici: il caso di Castelluccio di Norcia. 12 *Congresso Nazionale ANIDIS 'L'Ingegneria Sismica in Italia'*, (p. 10-14).