

# Le strutture ad arco negli aggregati su pendio: un caso studio nel centro storico di San Pio delle Camere (AQ)



Roberta Fonti, Antonio Formisano, Federico M. Mazzolani

*Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura – Università di Napoli “Federico II”, Piazzale Tecchio 80, 80125 Napoli*

*Keywords: Muratura in pietra grezza, strutture a volta, casa su pendio, vulnerabilità sismica, analisi non lineari*

## ABSTRACT

Lo studio della vulnerabilità sismica dei centri storici minori, a seguito dei recenti eventi sismici che hanno investito buona parte della penisola italiana, ha ormai assunto grande rilevanza ed attualità in ambito scientifico. Un'intensa attività di studio e ricerca è stata condotta nei comuni di Poggio Picenze e San Pio delle Camere, siti in provincia di L'Aquila e duramente colpiti dal sisma del 6 Aprile 2009. Con particolare riferimento al comprensorio Sampiano, nell'ambito del progetto DPC-ReLUIS 2010-2013, è stata avviata una collaborazione con l'Unità di Ricerca dell'Università di Pisa (coordinatore Mauro Sassu) finalizzata ad uno studio sistematico, distinto in tre fasi fondamentali, del centro storico investigato, con l'obiettivo finale di individuare un modello interpretativo di base per i diversi moduli aggregativi rinvenuti sul territorio. Nel dettaglio, la memoria farà riferimento alla forte intercorrelazione fra il tessuto edilizio e le possibilità compositive offerte dall'orografia del sito, che hanno consentito l'individuazione di un caso studio tipico della tecnica costruttiva locale, rappresentato da un edificio isolato con strutture a volta a tutti i livelli e sviluppo su pendio lungo la linea di massima pendenza. L'obiettivo ultimo dello studio è stata la valutazione, secondo gli strumenti di analisi disponibili in letteratura, del livello di vulnerabilità sismica della specifica tipologia di edificio oggetto di indagine.

## 1 INTRODUZIONE

Lo studio dei centri storici minori, alla luce degli ultimi eventi tellurici, ha messo in evidenza come l'edificato rurale a carattere minuto, sviluppatosi nei secoli lungo la dorsale appenninica, sia essenzialmente realizzato in pietra grezza secondo i dettami della regola dell'arte locale e si presenti, in relazione alla realtà orografica in cui risulta inserito, in configurazioni d'insieme secondo moduli scatolari. Nella presente memoria, partendo dalla breve definizione dei principali caratteri insediativi degli edificati su pendio, viene definito l'inquadramento storico-sismico, nonché tecnico-costruttivo, dell'area aquilana, gravemente colpita dal sisma del 6 Aprile 2009,

nell'ambito della quale viene identificato un caso di studio analizzato secondo le indicazioni delle “Linee Guida sui Beni Culturali” (MiBAC 2010).

## 2 FASE I: INDIVIDUAZIONE DEI CONNOTATI TECNICO COSTRUTTIVI DELL'AREA AQUILANA

L'analisi degli insediamenti su pendio e delle relative modalità aggregative è una tematica difficoltosa e molto variegata, inscindibile dal contesto orografico che la individua, che risulta relazionata alle necessità rurali socio-economiche e disponibilità di materie prime reperibili nel comprensorio specifico di afferenza degli stessi insediamenti (Fonti et al. 2011).

Tuttavia, pur nella complessità dell'argomento, muovendosi da considerazioni

basilari come l'acclività del pendio e le semplici esigenze delle realtà pastorali, è possibile distinguere cinque tipologie d'insediamento e tre moduli aggregativi basilari.

Le tipologie d'insediamento possono essere di:

- Culmine;
- Promontorio;
- Crinale;
- Versante;
- Fondovalle.

Fra i moduli aggregativi basilari si distinguono invece i seguenti:

- *Casa su pendio semplice*, con sviluppo in aggregato lungo un asse viario principale o lungo la linea di massima pendenza;
- *Casa a profferlo*, con inclinazione medio-forte della linea di massima pendenza e con sviluppo in aggregato analogo al caso della casa su pendio semplice;
- *Edificio isolato*, con sviluppo lungo la linea di massima pendenza e numero di piani seminterrati da 1 a 2 in relazione all'acclività del pendio naturale.

Gli insediamenti di *culmine* e di *versante* risultano essere quelli più frequentemente diffusi sul territorio aquilano: tipici esempi di dette tipologie sono riscontrabili negli edificati storici di San Pio delle Camere (Fig.1) e Poggio Picenze.

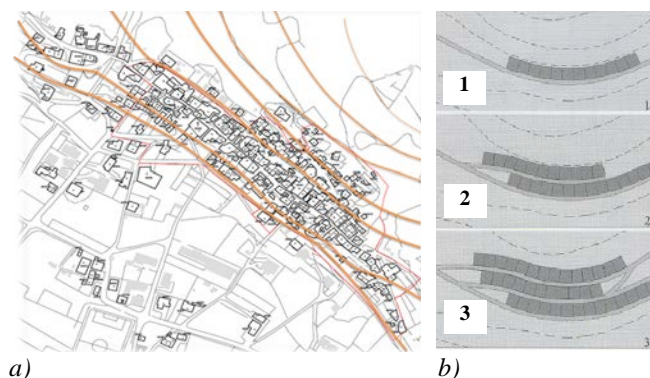


Figura 1. a) Planimetria del Comune di San Pio delle Camere (AQ): a) un esempio di insediamento di versante; b) Processo di formazione del tessuto edilizio: 1. Edificato con fronte principale a monte; 2. ulteriore percorso che diparte da quello principale e si pone in posizione ad esso parallela e a quota più alta; 3. sviluppo progressivo del modello insediativo (Ceradini, 2002).

Il primo mostra isolati di forma *irregolare, per lo più stretti e lunghi*, che si sviluppano ortogonalmente alla linea di massima pendenza del terreno, con le particelle di testa delimitate le une dalle altre dalla viabilità principale, formata da percorsi che seguono naturalmente l'orografia del terreno alle diverse quote altimetriche, con andamento pressoché parallelo alle curve di

livello, e dalla struttura viaria secondaria, con percorsi ortogonali a quelli principali che permettono la risalita dalle quote più basse verso il fulcro o culmine dell'insediamento.

Il secondo, invece, prevede un processo di formazione del tessuto parallelo alle curve di livello secondo un effetto di *contraffortamento continuo* dato dalle modalità aggregative vere e proprie degli *insediamenti su pendio* (Fig. 1).

Gli aggregati così definiti in ambedue le varianti tipologiche d'insediamento demarcano un profilo scalettato tipico della *“casa a profferlo o su pendio semplice”*, che presenta una ridotta vulnerabilità sismica. Infatti, l'edificato risulta essere limitato in altezza e contrastato lungo il profilo di massima pendenza (Fig. 2). Inoltre, la presenza di *archi di contrasto*, detti anche a *sbadacchio* (Fig. 3), garantiscono un'importante partecipazione strutturale fra i corpi di fabbrica diversamente articolati nell'interezza del tessuto edilizio, concorrendo parimenti a garantire un'ottimale risposta sotto le azioni sismiche, identificandosi come elementi deboli deputati a mantenere distanziati gli elevati strutturali ed a smorzare l'energia sismica in ingresso attraverso la cernierizzazione fino al collasso.



Figura 2. Esempi di tessuto edilizio su pendio nei centri storici minori dell'area aquilana (San Pio delle Camere).



Figura 3. Esempi di archi di contrasto o a sbadacchio (San Pio delle Camere - AQ).

### 3 FASE II: INDIVIDUAZIONE DEL CASO STUDIO

#### 3.1 L'edificato storico di San Pio delle Camere e le tipologie costruttive prevalenti

Il caso studio oggetto della presente ricerca, che di seguito si andrà a definire nei suoi caratteri di base, è il centro storico di San Pio delle

Camere (AQ) (Fig. 4) che, proprio per la sua collocazione geografica, rispecchia i connotati tecnico-costruttivi propri degli insediamenti di versante (Sassu 2010).



Figura 4. Foto d'insieme del comprensorio edilizio di San Pio delle Camere (AQ).

Le particelle si sviluppano con forte pendenza in senso parallelo alle curve di livello, sfruttando al massimo le possibilità del sito. Il tutto si configura come un agglomerato edilizio omogeneo, con moduli aggregativi di base, distribuiti secondo le esigenze funzionali delle realtà rurali, caratterizzati dal profilo scalettato tipico della “*casa su pendio*” e prospetti principali rivolti verso valle e verso monte, rispettivamente con ambienti che risultano destinati prevalentemente ad attività pastorali con strutture a volta, anche articolate, ed ambienti prospettanti sugli assi viari principali, in direzione parallela alle diverse curve di livello. Questi ultimi risultano destinati ad attività commerciali ed abitative, articolati secondo due livelli fuori terra, coperti con solai lignei, semplici o composti, e/o con strutture a volta. I tetti, del tipo ligneo, risultano in prevalenza a falde del tipo semplice (Fig. 5), analogamente a quanto abacizzato dal Ceradini (2002) per le strutture su pendio Appenniniche, con particolare riferimento all'area Grecanica.

Per tutto quanto innanzi esposto è possibile, quindi, rinvenire due moduli aggregativi di base, i cui connotati tecnico-costruttivi risultano ripetibili e variamente articolati su tutto il territorio:

- *Casa su pendio*, con sviluppo in aggregato lungo un asse viario principale, con presenza di solai lignei d'interpiano o voltine in mattoni pieni disposti in foglio interposte a travi metalliche in profilo IPE e di un livello seminterrato coperto a volta, realizzata in pietrame.
- *Edificio isolato*, con sviluppo lungo la linea di massima pendenza, 1-2 piani seminterrati in relazione all'acclività del

pendio naturale (Fig. 6) e strutture a volta come orizzontamenti a tutti i livelli.

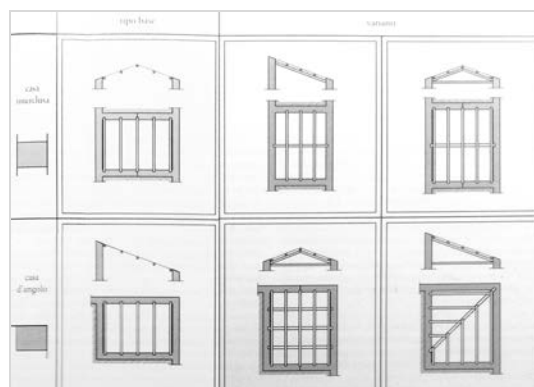


Figura 5. Abaco delle coperture: soluzioni tecnico-costruttive per tipo intercluso e d'angolo (Ceradini 2002).

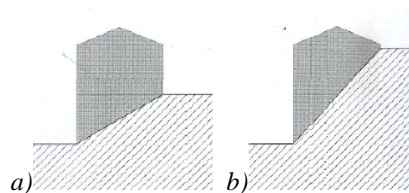


Figura 6. Collocazioni ricorrenti degli edifici rispetto al pendio naturale; a) casa su pendio medio; b) casa su pendio forte (Ceradini 2002).

E' possibile rinvenire in tali costruzioni la presenza di cavità o veri e propri ambienti ipogei; questi possono spingersi in profondità fino a lunghezze comprese tra i dieci e i venti metri, talvolta con cunicoli di collegamento interni fra essi.

Sono stati analizzati in dettaglio, mediante gli strumenti forniti dalle norme tecniche attualmente vigenti in tema di costruzioni sismiche (D.M. 14/01/08 2008; C.M. 02/02/09 2009) e beni culturali (MiBAC 2010), due casi studio presenti nel comprensorio Sampiano afferenti alle categorie sopra riportate. Nella presente memoria si farà riferimento alla sola categoria di *edificio isolato* su pendio, analizzato secondo il seguente iter operativo sviluppato in due step fondamentali:

- Step 1: Analisi storico-critica e rilievo del manufatto in esame;
- Step 2: Individuazione degli elementi strutturali di base, con particolare riferimento alle strutture a volta.

### 3.2 *Analisi storico-critica, rilievo ed individuazione delle strutture di base dell'edificio oggetto di indagine*

Sulla scorta delle indicazioni ReLUIIS, finalizzate a fornire uno strumento di analisi per il rilievo, la diagnostica, la scelta degli interventi e la redazione finale del progetto d'intervento su

edifici in aggregato (DPC-ReLUIS 2010; Formisano et al. 2012), è stato sviluppato lo step di analisi 1 per l'acquisizione delle conoscenze di base circa gli aspetti morfologico - costruttivi e storico - critico - evolutivi della fabbrica in oggetto.

L'iter operativo finalizzato al raggiungimento degli obiettivi prefissati è stato condotto secondo il seguente percorso funzionale:

- Identificazione dell'aggregato nel contesto ambientale ed urbano (Fig. 7);
- Ipotesi sulla formazione ed evoluzione dell'aggregato;
- Rilievo geometrico;
- Rilievo costruttivo-strutturale;
- Analisi della sismicità storica.

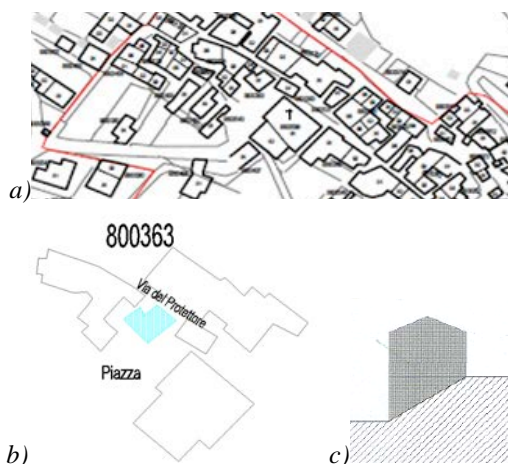


Figura 7. Individuazione edificio oggetto di studio; a) stralcio planimetrico del comune di San Pio delle Camere (AQ); b) Estratto di mappa con individuazione del caso studio; c) Casa su pendio medio: tipologia di riferimento del caso studio.



Figura 8. Edificio oggetto di analisi (Foto di M. Russo).

A seguito di sopralluogo coordinato in accordo con l'unità di ricerca di Mauro Sassu e gli enti istituzionali preposti, si è proceduto con la lettura del lessico costruttivo della fabbrica (tipo muratura, discontinuità strutturali, assenza di ammorsamento agli incroci murari e fra muri e solai, tipologie orizzontamenti), l'ispezione dei vari ambienti e la ricognizione di eventuali modificazioni strutturali subite dal manufatto nel corso del tempo (aperture di nuovi vani,

variazione nella scansione degli ambienti interni alla scatola muraria principale e rifacimenti storici dei solai intermedi e/o delle coperture).

Una vista d'insieme dell'edificio investigato, ubicato in posizione centrale nei pressi della piazza principale ed in aderenza alla Chiesa maggiore, è riportata in Figura 8.

Da quest'attento studio preliminare, volto a fornire un primo giudizio qualitativo sul corpo di fabbrica in esame, è stato possibile evidenziare la sua eleggibilità a caso studio rappresentativo dei connotati tecnico-costruttivi dei centri storici minori aquilani. In particolare è stata operata una prima attenta lettura della morfologia degli elementi murari in opera e dell'organizzazione degli stessi in macroelementi (Fig. 9), mentre successivamente sono state analizzate le fasi evolutive inerenti la formazione del fabbricato.



Figura 9. Campioni di murature 1m x 1m rappresentativi dell'edificato storico di San Pio delle Camere.

Quest'ultimo aspetto ha evidenziato 3 fasi basilari di evoluzione dell'edificio: nella prima si nota l'edificazione di buona parte del fabbricato in un'unica soluzione (Fig. 10a); nella seconda si registra l'ampliamento della porzione del manufatto rivolta verso via del Protettore (Fig. 10b), probabilmente a seguito della trasformazione della stessa via in arteria principale di collegamento; nella terza ed ultima fase, di più recente datazione, si assiste infine alla sopraelevazione di un solo ambiente, sempre lungo il medesimo prospetto (Fig. 11).

Conclusa la parte inerente il giudizio qualitativo sulla valutazione del rispetto della buona regola dell'arte del costruire, si è proceduto, allo scopo di conseguire un livello di conoscenza di tipo LC1, con il rilievo geometrico e strutturale del fabbricato (Fig. 12).

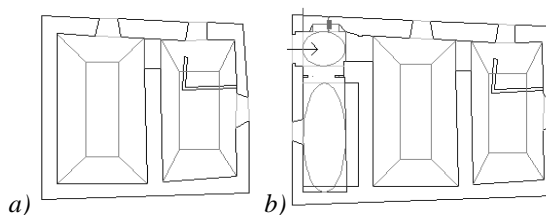


Figura 10. Pianta piano terra dell'edificio oggetto di studio: a) Fase evolutiva n.1; b) Fase evolutiva n.2.

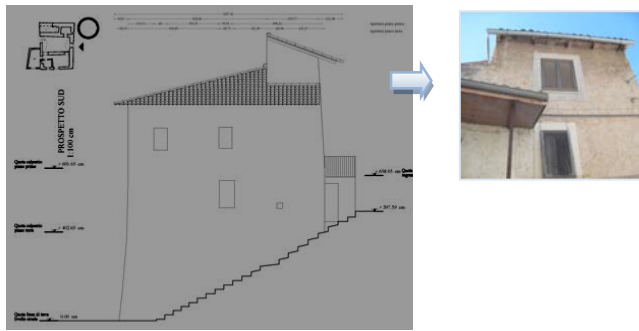


Figura 11. Sopraelevazione dell'edificio investigato (Fase evolutiva n.3). (Russo, 2012)

L'edificio, realizzato su pianta pseudo-quadrata in muratura di pietra grezza, si sviluppa in elevato su quattro livelli, di cui uno seminterrato, uno rialzato, uno posto interamente fuori terra, mentre il quarto è contraddistinto da una sopraelevazione relativa ad un solo ambiente. Il manufatto storico mostra spessori murari molto variabili con profili a scarpa su tutti i lati e strutture a volta a tutti i livelli.

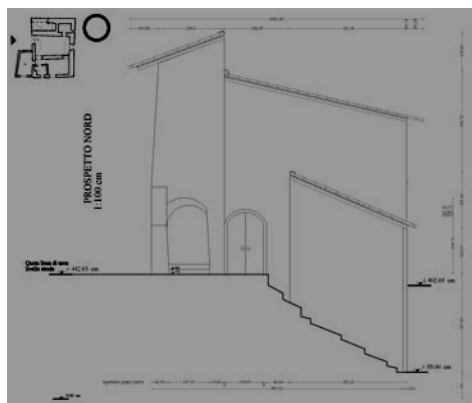


Figura 12. Rilievo geometrico dell'edificio: prospetto nord lungo la linea di massima pendenza. (Russo, 2012)

A tal proposito è d'uopo sottolineare che non è stato possibile effettuare, come spesso accade nella pratica comune, le dovute indagini sia a livello meccanico-costruttivo sui materiali in elevato, che relativamente alla meccanica dei terreni e delle fondazioni. Tuttavia, avendo parzialmente ottemperato alle indicazioni riportate nella Tabella 4.1 del §4.2 delle Linee Guida, sono stati determinati i diversi coefficienti parziali di sicurezza che concorrono a determinare il fattore di confidenza della costruzione (Tabella 1). In tale tabella si può osservare che, nonostante sia stata operata un'analisi circa le fasi costruttive dell'edificio, a causa dell'assenza pressoché totale delle documentazioni e delle fonti storiche di riferimento, si è preferito assumere il valore massimo per il relativo fattore di confidenza.

Tabella 1. Definizione del Fattore di Confidenza (FC).

Rilievo geometrico	Completo con restituzione grafica dei quadri fessurativi e deformativi.	$F_{C1} = 0$
Identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica	Restituzione ipotetica delle fasi costruttive basata su un limitato rilievo materico degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione.	$F_{C2} = 0.12$
Proprietà meccaniche dei materiali	Limitate indagini sui parametri meccanici dei materiali.	$F_{C3} = 0.06$
Terreno e fondazioni	Limitate indagini sul terreno e le fondazioni, in assenza di dati geotecnici e disponibilità d'informazioni sulle fondazioni.	$F_{C4} = 0.06$

La determinazione di tale fattore di confidenza è richiesta sia che si voglia procedere ad una analisi sismica globale del manufatto attraverso una modellazione in campo non lineare, sia che si voglia far riferimento a modelli che considerano il materiale muratura infinitamente resistente a compressione e monolatero, considerando i differenti macroelementi come blocchi rigidi diversamente vincolati.

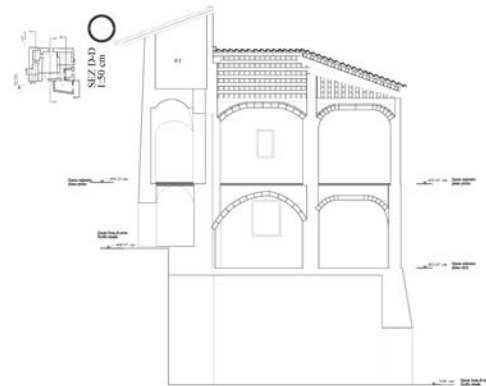


Figura 13. Rilievo geometrico: sezione longitudinale D-D. (Russo, 2012)

A chiusura di questo primo fondamentale step di analisi è stato possibile evidenziare la presenza di strutture ad arco a tutti i livelli con variazione della tipologia strutturale dalle semplici volte a botte, erette ai piani seminterrato e rialzato, fino alle più articolate volta a padiglione o a vela, distribuite ai piani superiori in conseguenza all'esigenza di ricorrere a strutture sempre meno spingenti (Fig. 13).

Tuttavia, la presenza di strutture ad arco non adeguatamente rilevate pone una problematica di partenza di non immediata soluzione. Infatti, la ricerca dell'effettiva sezione resistente, delle predette strutture, può essere effettuata solamente tramite l'individuazione, in condizioni statiche, di una possibile configurazione d'equilibrio che consenta, quindi, di ricavare, anche sulla base delle misure rilevate in sito, l'effettiva

configurazione all'estradosso sia dei singoli elementi voltati (Fig. 14) che dei differenti sistemi volta-piedritto con presenza o meno di elementi d'irrigidimento estradosali.

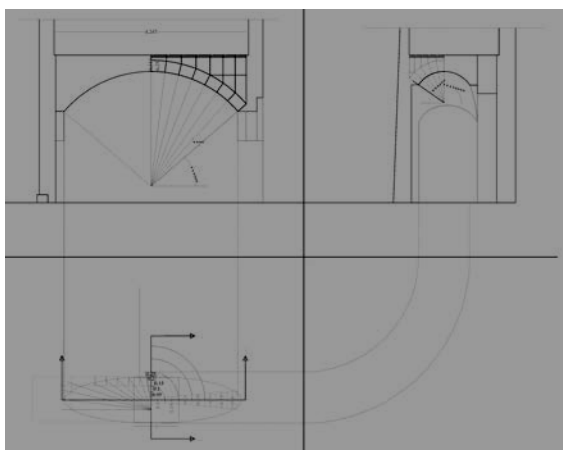


Figura 14. Discretizzazione degli elementi della volta a vela su pianta rettangolare sita in corrispondenza del livello completamente fuori terra.

Per questo motivo sono state svolte verifiche di tipo grafico mediante l'approccio dell'analisi a collasso.

Si precisa che la predetta fase di analisi non permette di recuperare il gap che intercorre fra un Livello di Conoscenza di tipo LC1 e quelli successivi, che richiedono informazioni di maggiore dettaglio, ma consente di ottenere un buon controllo della struttura in condizioni statiche e di applicare la procedura di verifica LV3 prevista dalle "Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale", allineate alle NTC 08, per l'analisi sismica del fabbricato attraverso un modello numerico di dettaglio in campo non lineare, che rappresenta l'obiettivo finale della ricerca.

## 4 FASE III: VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA DEL CASO STUDIO

### 4.1 Introduzione

Nel seguito verrà esaminata la vulnerabilità sismica del manufatto secondo i diversi approcci offerti dalle Linee Guida sopra menzionate. In particolare verranno eseguite verifiche numeriche secondo quanto previsto dall'approccio semplificato LV1 e da quello di dettaglio LV3, i cui risultati verranno raffrontati con il fine ultimo di estrinsecare il divario che intercorre fra le due metodologie e di valutare quanto sia realmente possibile

modellare in dettaglio una struttura come quella oggetto di analisi, che presenta oggettive difficoltà di base relative ad una corretta modellazione geometrica. Si precisa, inoltre, che essendo il caso studio ubicato in uno dei centri storici minori dell'area aquilana maggiormente colpiti dal terremoto del 2009 e non avendo mostrato incipienti meccanismi locali di collasso, si è ritenuto non strettamente necessario valutare in questa sede la vulnerabilità sismica del manufatto tramite le procedure di calcolo inerenti all'approccio LV2.

È appena il caso di sottolineare come il quadro normativo vigente italiano non presenti una trattazione esaustiva né sulle strutture a volta e sull'interazione che tali volte hanno con il complesso strutturale, né sulla tipologia degli edifici su pendio, per i quali si può cautelativamente assumere per il calcolo semplificato del periodo di vibrazione  $T_1$ , se questo risulta inferiore al periodo limite dello spettro  $T_c$ , l'altezza della parte di struttura di maggiore estensione, ossia comprensiva di eventuali piani seminterrati.

Di conseguenza è possibile asserire che la presente normativa dovrebbe tener esplicitamente conto dei seguenti aspetti:

- identificazione del comportamento meccanico delle murature in pietra grezza come categoria muraria a sé stante;
- trattazione esplicita delle strutture ad arco, con classificazione tipologica ed analisi del comportamento strutturale delle stesse;
- individuazione di un coefficiente correttivo da tenere in conto nell'analisi LV1 per il calcolo dell'accelerazione di collasso di edifici irregolari sulla base dei risultati derivanti da modelli di calcolo più raffinati (analisi LV3).

Il caso studio in esame risulta riconducibile alla categoria "Palazzi e ville ed altre strutture con pareti di spina ed orizzontamenti intermedi", secondo i modelli di valutazione per tipologia proposti dalle Linee Guida al §5.4. Sebbene si registri la presenza di strutture a volta e di profili murari a scarpa, nonché l'assenza di uno schema codificato di *pianta bloccata* generalmente attribuibile a questa categoria specifica di edifici, ciò nonostante è possibile ascrivere il caso studio in oggetto, con le dovute precauzioni in fase di lettura dei risultati ottenuti, alla tipologia ben più regolare dei palazzi e delle ville. In particolare, per ciò concerne la presenza delle strutture a volta, si

riporta di seguito l'indicazione offerta dalle Linee Guida (MiBAC 2010):

*“Nel caso di strutture portanti orizzontali formate da elementi voltati, in funzione della tipologia delle volte, delle caratteristiche del materiale, del loro spessore e del tipo di connessione alle imposte, potrà essere valutato un valore opportuno per la rigidità da attribuire al solaio equivalente. Per quest'ultimo è consentito ipotizzare un comportamento elastico lineare, purché sia definita una deformazione angolare ultima nel piano, funzione della tipologia di volta.”* (Linee Guida 2010 - §5.4.2).

Definito, quindi, il modello meccanico a cui riferirsi per le volte, è stato possibile valutare la vulnerabilità sismica, dapprima, tramite il metodo semplificato LV1 inerente la specifica tipologia (cfr. §5.4.2 MiBAC 2010) e successivamente, attraverso un modello di dettaglio, in accordo con le procedure riportate al paragrafo §5.3 delle citate Linee Guida sui Beni Culturali, tramite l'utilizzo del programma di calcolo TREMURI® (Galasco et al. 2001), mediante il quale sono state condotte analisi di tipo statico non lineare. I risultati dei due modelli di analisi sono di seguito dettagliatamente riportati.

#### 4.2 Il modello semplificato LV1

Il modello semplificato LV1 fornisce indicazioni utili alla valutazione della vulnerabilità sismica su scala territoriale. Tuttavia, seppur nella sua estrema generalizzazione, esso può fornire una stima preliminare ed efficace della risposta globale del manufatto attraverso la valutazione del comportamento delle proprie pareti nel loro piano allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (Tabella 2). Il fine ultimo di tale analisi è quello di calcolare l'accelerazione sismica sopportabile dal manufatto e di comparare tale livello di accelerazione col valore di riferimento del sito in cui risulta ubicato il manufatto stesso, definito secondo i criteri adottati dalle NTC 08 per tutte le costruzioni in funzione della loro vita nominale e della classe d'uso di riferimento.

Tabella 2. Valori di riferimento dell'azione sismica per lo Stato Limite analizzato.

Stato Limite	SLV
$P_{vr}$ (%)	10
$T_R$ (anni)	475

Si riportano in Tabella 3 i dati assunti per la determinazione della pericolosità sismica della zona in esame.

Tabella 3. Parametri di definizione della vita di riferimento.

Parametri	Valori
Vita nominale ( $V_N$ )	$\geq 50$
Classe d'uso ( $C_u$ )	(II) $C_u=1.0$
Vita di riferimento ( $V_R$ )	$\geq 50$

Conoscendo le coordinate geografiche del sito e il periodo di ritorno dell'azione sismica è possibile, quindi, ricavare i parametri fondamentali dello spettro allo SLV relativo al sito di San Pio delle Camere (AQ), riportati in Tabella 4.

Tabella 4 Valori di  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_c^*$  allo SLV per il sito di San Pio delle Camere (AQ)

	Stato Limite Salvaguardia della Vita (SLV)
$T_R$ (anni)	475
$a_g$ ( $m/s^2$ )	2.522
$F_0$ (-)	2.37
$T_c^*$ (sec)	0.35

Per la determinazione degli spettri elastici è necessario definire le caratteristiche del suolo e della specifica categoria topografica (Tabella 5), che tiene conto in una certa misura dell'acclività del pendio e, pertanto, dei relativi coefficienti amplificativi, topografici e stratigrafici caratterizzanti l'edificato su roccia. Tuttavia, non è possibile tenere conto della presenza di cavità ed ambienti ipogei, i quali risultano presenti in maniera costante in tutta l'area del centro storico di San Pio delle Camere (AQ).

Tabella 5. Parametri di amplificazione stratigrafica e topografica e valori di accelerazione del suolo.

	SLV
Categoria del suolo	A
Categoria Topografica	T2
$S_s$ (-)	1
$C_c$ (-)	1
$S_T$ (-)	1.2
$S$ (-)	1.2
$a_g S$ ( $m/s^2$ )	3.03

Dopo aver definito lo spettro di risposta elastico in accelerazione, così come indicato nel §3.2.3.2 delle NTC08 (D.M. 14/01/08 2008), nonché la relativa riduzione delle forze elastiche, al fine di tenere conto della capacità dissipativa anelastica della struttura in esame, è stata calcolata, in base a quanto previsto dalla procedura semplificata LV1, l'ordinata spettrale ridotta con riferimento alla condizione che porta la struttura in esame al raggiungimento dello SLV, in accordo alla seguente espressione:

$$Se_{,SLV} = \frac{q \cdot F_{SLV}}{e^* \cdot M} \quad (1)$$

dove:

- $F_{SLV}$  è la resistenza a taglio dell'edificio;
- $q$  è il fattore di struttura;
- $M$  è la massa sismica totale;
- $e^*$  è la frazione di massa partecipante relativa al primo modo di vibrare.

La  $F_{SLV}$  (Linee Guida – Eq. 5.3) viene assunta come il valore minore fra quelli stimati secondo due direzioni di analisi ( $x$  ed  $y$ ) scelte secondo la disposizione planimetrica prevalente degli assi dei muri portanti, prendendo in esame l'eventualità del collasso ai diversi piani della costruzione. Si premette fin da subito che i valori di resistenza ottenuti per l'ultimo livello non sono stati considerati per la determinazione di  $F_{SLV}$  in quanto, essendo relativi alla sopraelevazione di solo una parte della pianta, sono ritenuti non rappresentativi del comportamento dell'ultimo livello alla stregua di quelli sottostanti.

Il modello consiste nel considerare, per ciascuna direzione, i pannelli murari come elementi portanti verticali e nell'ipotizzare che il collasso avvenga quando la tensione tangenziale media raggiunge un'opportuna quota parte della resistenza a taglio della muratura.

Per il calcolo delle resistenze a taglio delle murature il coefficiente d'irregolarità in pianta, avendo a disposizione un attento rilievo geometrico dell'edificato, è stato valutato in modo accurato, calcolando il baricentro delle masse e delle rigidezze di tutti gli impalcati.

Inoltre, si precisa che nel rintracciare una fra le infinite condizioni di equilibrio rinvenibili per ogni struttura a volta, in ambedue le direzioni ed in relazione alla geometria e distribuzione dei flussi tensionali lungo gli sviluppi murari, è stata operata una attenta analisi dei carichi con distribuzione dei pesi e degli eventuali sistemi di irrigidimento estradossali secondo idonee funicolari dei carichi atte a conferire le ricercate condizioni di equilibrio e stabilità.

Pertanto, coerentemente con quanto previsto dalle Linee Guida, per il valore di calcolo della resistenza a taglio della muratura, si è proceduto ad una stima del valore della  $\tau_{0d}$  agente su ogni maschio murario a tutti i livelli (Tabella 6), tenendo conto delle specificità delle diverse tipologie di strutture a volta presenti lungo lo sviluppo verticale dell'edificio.

Una volta determinati i valori di resistenza a taglio dell'edificio secondo le due direzioni di analisi, sono state calcolate le ordinate spettrali secondo le stesse direzioni per ciascun livello

strutturale. In Tabella 7 sono riportati a titolo di esempio i predetti calcoli condotti in direzione  $y$ .

Tabella 6. Valori di  $\tau_{di}$  stimati ai vari piani per il caso studio in analisi.

	$\tau_{0d}$ (N/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_{0i}$ (N/cm <sup>2</sup> )	$\tau_{di}$ (N/cm <sup>2</sup> )
Livello 1	5.1	18.79	9.48
Livello 2	5.1	17.99	9.34
Livello 3	5.1	12.15	8.20
Livello 4	5.1	1.47	5.57

Tabella 7. Determinazione della resistenza al taglio dell'edificio e dell'ordinata spettrale in direzione  $y$ .

Direzione $y$	Unità misura	Piano 1	Piano 2	Piano 3
$M_i$	(N/g)	214742	209935	212933
$e^*$	(-)	0.86		
$k_i$	(-)	0.25	0.50	0.75
$\sigma_{0i}$	(N/cm <sup>2</sup> )	18.79	17.99	12.15
$\tau_{di}$	(N/cm <sup>2</sup> )	7.65	7.53	6.62
$A_{vi}$	(m <sup>2</sup> )	11.13	10.24	6.70
$x_{ci}$	(m)	3.34	3.28	3.30
$x_{gi}$	(m)	3.37	3.12	3.11
$e_{xi}$	(m)	0.03	0.16	0.17
$\beta_{yi}$	(-)	1.02	1.12	1.13
$\mu_{vi}$	(-)	0.80		
$\xi_{v,i}$	(-)	1.00		
$\zeta_{v,i}$	(-)	1.00		
$F_{slv,vi}$	(kN)	2150.38	886.10	338.39
$S_{eslv,vi}$	(g)	11.93	4.92	1.88

Nel caso in esame il valore minimo della resistenza a taglio risulta essere quello relativo al terzo livello in direzione  $y$ . A questo punto, per poter calcolare il valore dell'accelerazione che porta al raggiungimento dello SLV, viene calcolato il periodo fondamentale di vibrazione della struttura  $T_1$  secondo la nota formulazione di norma (D.M. 14/01/08 2008) che fornisce, trascurando la presenza dei livelli seminterrati, un valore di 0.342 s, periodo che ricade nel tratto ad accelerazione costante dello spettro.

Pertanto, applicando l'eq. (5.2) riportata al §5.4.2 delle Linee Guida (2010), vengono ricavati i valori delle accelerazioni riferite al suolo rigido (Categoria A) che portano al raggiungimento dello Stato Limite Ultimo SLV lungo le due direzioni di analisi  $x$  ed  $y$ . Tali accelerazioni, indicate rispettivamente come  $S_{eSLV,x}$  e  $S_{eSLV,y}$ , valgono 0.65m/s<sup>2</sup> e 0.66 m/s<sup>2</sup>.

Essendo l'accelerazione sismica di riferimento del sito  $a_{g,SLV}$  pari a 2.52 m/s<sup>2</sup>, il livello di sicurezza sismica della struttura, ovvero il fattore di accelerazione  $f_{a,SLV}$ , calcolato secondo la seguente espressione:



$$f_{a,SLV} = \frac{Se_{,SLV}}{a_{g,SLV}} \quad (2)$$

assume in direzione  $x$  ed  $y$  rispettivamente i valori di 0.260 e 0.262.

Concluso questo primo livello di verifica, nel seguito verrà valutata la sicurezza nei confronti delle azioni sismiche secondo il modello di analisi di dettaglio LV3, allo scopo di operare un utile confronto con i risultati sopra determinati.

#### 4.3 La valutazione complessiva della risposta sismica del manufatto: il livello di analisi di dettaglio LV3

Come già premesso, le analisi eseguite, di tipo statico non lineare, hanno visto l'impiego del programma di calcolo Tremuri® (Galasco et al. 2001), che impiega una modellazione tridimensionale a telaio equivalente delle strutture murarie.

Tutte le pareti sono state munite di presidi antisismici, quali le catene metalliche, per sopperire all'impossibilità di modellare sia l'azione di contrasto e contenimento offerta alle pareti murarie dall'ammorsamento a scarpa continuo su tutti i lati dell'edificio, che la presenza del terreno ai livelli seminterrati, che tende ad opporsi alla spinta delle strutture voltate sulle murature. Inoltre sono stati inseriti elementi di irrigidimento, quali frenellature, imposte solidali e/o veri e propri soprarchi, all'estradosso delle strutture ad arco. Tali elementi, aventi anche funzione di collegamento fra le murature, sono stati definiti sulla base delle verifiche di tipo grafico condotte a tappeto su tutte le strutture voltate (vedi par. 3.2), finalizzate all'individuazione delle condizioni di equilibrio ideale in fase statica, che forniscono gli spessori strutturali delle strutture voltate stesse. In particolare, per le strutture voltate a padiglione e quelle ribassate con schifo centrale, è risultato necessario inserire frenellature continue, poste a intervalli regolari, atte a dare collegamento diretto alle murature d'ambito. Le frenellature, ponendosi come sistema di irrigidimento degli ambienti sommitali in grado di dare maggiore stabilità alle strutture voltate, risultano capaci di ridurre le possibilità di attivazione di meccanismi flessionali di effetto ad arco nelle sezioni murarie. Viste tridimensionali del modello a macroelementi dell'edificio sono illustrate in Figura 15.

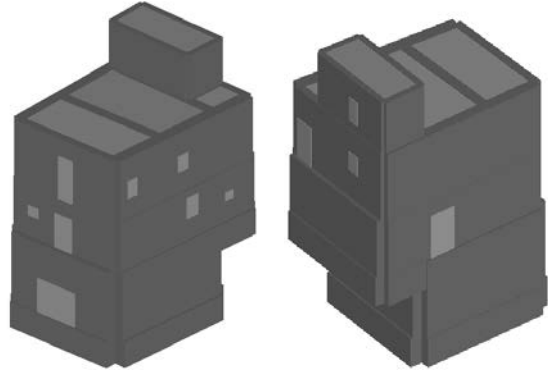


Figura 15. Viste 3D del modello a macroelementi dell'edificio oggetto di analisi.

Le analisi statiche non lineari condotte in direzione  $x$  ed  $y$  restituiscono curve bilineari che riportano, per ogni passo dell'analisi, in ascissa *lo spostamento di un nodo di controllo* ed in ordinata *il taglio alla base complessivo*. Tali curve vengono trasformate successivamente nelle curve di capacità, tenendo conto delle caratteristiche di massa e rigidità dell'oscillatore equivalente ad un unico grado di libertà.

La verifica sostanzialmente restituisce il raffronto tra la curva rappresentativa della capacità offerta dalla struttura e la curva della domanda rappresentata dall'azione sismica di progetto, nonché il confronto tra lo spostamento massimo richiesto dalla normativa e lo spostamento massimo  $d_u^*$  offerto dalla struttura allo SLU. Analoghi confronti in termini di spostamenti si effettuano anche per la verifica agli Stati Limite di Esercizio. Tenendo ulteriormente in considerazione l'eccentricità propria della struttura frutto del disallineamento fra il baricentro delle masse e quello delle rigidità, si perviene a 24 differenti analisi che portano in conto le varie combinazioni tra distribuzioni di forze, direzione e verso considerati.

Si riportano in Tabella 9 i dati riassuntivi relativi alle analisi più gravose condotte sull'edificio nelle direzioni  $x$  ed  $y$  allo SLV, allo SLD (danno) e allo SLO (operatività). Per ciascuna analisi sono, in particolare, elencati i valori della capacità e della domanda di spostamento corrispondenti agli stati limite considerati, nonché gli indicatori di rischio  $\alpha_u$  ed  $\alpha_e$  valutati secondo l'OPCM 3362 dell'8 Luglio 2004.

Tabella 9. Risultati analisi statica non lineare.

N.	Dir.	Car. sismico	Ecc. [cm]	D <sub>Ma</sub> x [cm]	D <sub>u</sub> [cm]	q* SLU	D <sub>Ma</sub> x [cm]	D <sub>d</sub> [cm]	D <sub>Ma</sub> x [cm]	D <sub>o</sub> [cm]	Alfa u
10	+X	Masse	-42.9	3.94	2.13	3.00	1.23	2.13	0.92	2.13	<b>0.54</b>
24	-Y	1° modo	-32.2	2.38	1.35	2.33	0.74	1.35	0.56	1.35	<b>0.57</b>

Di seguito si riporta la curva di capacità relativa all'analisi n.24, che risulta essere la più gravosa in direzione  $y$  (Fig. 16).

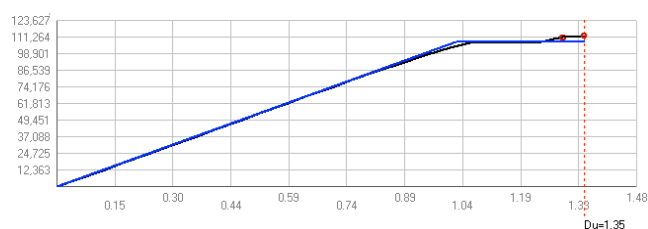


Figura 16. Curva di capacità e relativa bilineare per l'analisi n. 24 (dir.  $-y$ , forze prop. I modo ed eccentricità negativa).

Comparando i fattori di rischio desunti dall'analisi LV3, pari a 0.54 e 0.57 rispettivamente in direzione  $x$  ed  $y$ , con quelli ricavati dal modello LV1, pari a 0.260 e 0.262, si nota che l'analisi semplificata fornisce coefficienti molto cautelativi, con valori inferiori di circa il 50% rispetto ai primi determinati mediante analisi numeriche in campo non lineare.

## 5 CONCLUSIONI

Nella memoria è stato esaminata la vulnerabilità sismica di un edificio isolato tipico del centro storico di San Pio delle Camere (AQ), su cui sono stati applicati i modelli di analisi semplificata (LV1) e raffinata (LV3) previsti dalle Linee Guida sui Beni Culturali.

Il confronto fra i risultati ottenuti ha mostrato che l'analisi LV1 sottostima di circa il 50% l'accelerazione di collasso dell'edificio determinata secondo l'analisi LV3.

Pertanto, allo scopo di prevedere più precisamente con semplici metodi di calcolo i risultati ottenuti dall'impiego di programmi di calcolo non lineari, dovrebbe essere ridefinita, nel caso di edifici su pendio come quello in questa sede esaminato, l'espressione normativa per il calcolo della rispettiva frazione di massa partecipante relativa al primo modo di vibrare. Inoltre, è palese come risulti necessario studiare in dettaglio le strutture ad arco, la cui configurazione strutturale di solito non viene adeguatamente valutata a causa dell'impossibilità di effettuare indagini esaustive all'estradosso, al fine ottenere dei risultati il più possibile rappresentativi del reale comportamento di strutture come quella in esame. In condizioni sismiche poi, la presenza di strutture ad arco a tutti i livelli ed in tutti gli ambienti del caso studio indagato, nonché l'esistenza di frenellature all'estradosso delle volte capaci di fornire effetto irrigidente e di collegamento fra le murature su cui

scaricano le volte stesse, conferiscono un effetto globale di contraffortamento fra le parti strutturali, atto non solo ad eliminare le spinte inerziali, ma anche ad opporsi efficacemente alle azioni sismiche.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano il Prof. Mauro Sassu e l'Ing. Marco Andreini dell'Università di Pisa per la documentazione ed i rilievi forniti relativi al centro storico di San Pio delle Camere (AQ), i rappresentanti della Municipalità del predetto comune per la collaborazione nelle fasi di rilievo, il Progetto DPC-ReLUIS 2010-2013, che ha ispirato e finanziato la presente attività di ricerca, la S.T.A.DATA per la gentile concessione del software 3MURI, nonché le tesiste Marina Russo e Daniela D'Ambrosio per l'entusiastica partecipazione alle attività oggetto della presente memoria.

## BIBLIOGRAFIA

- Ceradini, V. (a cura di), 2002. *Codice di pratica per la sicurezza e la conservazione degli insediamenti storici dell'Area Grecanica*. Gangemi: Roma.
- Circolare 2 Febbraio 2009, n°617 (C.M.), 2009. *Istruzioni per l'applicazione delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 Gennaio 2008*, G.U. n. 47 del 26/02/2009 – Suppl. Ordinario n. 27.
- D.M. 14/01/08, 2008. *Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)*, G.U. n. 29 del 04/02/2008 - Suppl. Ordinario n. 30.
- DPC-ReLUIS, 2010. *Linee Guida per il rilievo, l'analisi ed il progetto di interventi di riparazione e consolidamento sismico di edifici in muratura in aggregato*, Ufficio del Vice-Commissario Delegato per la Messa in Sicurezza dei Beni Culturali, Struttura Tecnica di Missione Maggio.
- Formisano, A., Fonti, R., Mazzolani, F.M., 2012. The Historical Centre of Poggio Picenze after L'Aquila Earthquake: Behaviour and Strengthening of Masonry Aggregate Walls. *Proc. of 8<sup>th</sup> Int. Conference on Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC 2012)*, Wroclaw, October 15-17.
- Galasco, A., Lagomarsino, S., Penna, A., 2001. *TREMURI Program: Seismic Analysis of 3D masonry buildings*.
- Ministero per i Beni e le Attività Culturali (MiBAC), 2010. *Circolare 2 Dicembre 2010 n°26 "Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale allineate alle nuove Norme tecniche per le costruzioni (D.M. 14/01/08)"*.
- Russo, M. 2012. *Analisi sismica di strutture a volta: il caso di un edificio isolato nel centro storico di San Pio delle Camere (AQ)*. Tesi di Laurea in Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Napoli "Federico II".
- Sassu, M., 2010. *Studio e indagini sul rischio sismico del centro storico di San Pio delle Camere (AQ)*. Edizioni ETS, Pisa, ISBN 978-884673077-0.