



# Caratterizzazione tipologico-strutturale e valutazione della vulnerabilità sismica dell'edificato ordinario in muratura della Provincia di Caserta attraverso i parametri della scheda CARTIS

Valentina Corlito<sup>a</sup>, Gianfranco De Matteis<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Dipartimento di Architettura e Disegno Industriale – Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli", Aversa (CE)*

*Keywords: Scheda CARTIS; patrimonio edilizio; edifici in muratura; vulnerabilità sismica; scala territoriale*

## ABSTRACT

La valutazione del rischio sismico del patrimonio edilizio esistente in muratura rappresenta una questione di fondamentale importanza in Italia, in considerazione dell'elevata pericolosità sismica del territorio e della grande densità di edifici collocati nelle aree esposte. La complessità del problema e l'insufficienza di informazioni reperibili a livello nazionale comportano notevoli incertezze nella stima della vulnerabilità sismica di tali strutture e nella valutazione del rischio a cui le stesse risultano esposte. Attraverso una lettura critica dei dati raccolti mediante la compilazione della scheda CARTIS (sviluppata nell'ambito del progetto ReLUI), la presente memoria si propone di indagare il patrimonio edilizio della Provincia di Caserta, individuando i principali caratteri tipologico-strutturali delle costruzioni in muratura (MUR) rilevate nel territorio, considerando la frequenza di parametri ritenuti significativi. La memoria presenta inoltre un modello predittivo finalizzato alla valutazione della vulnerabilità sismica delle tipologie MUR più ricorrenti, calibrato sulla base delle indagini territoriali condotte in seguito ad eventi sismici del passato e riadattato sulla base dei dati forniti dalla scheda CARTIS. I valori di vulnerabilità associati a ciascuna tipologia potranno essere quindi utilizzati per definire possibili scenari di danno indotti da terremoti di differenti intensità sulle tipologie di edifici in oggetto.

## 1 INTRODUZIONE

La conoscenza del livello di rischio sismico a cui risulta soggetto il patrimonio edilizio esistente rappresenta un problema non trascurabile per la sua protezione e conservazione nel tempo. Questo concetto assume uno spessore particolarmente notevole in Italia, territorio contraddistinto da una pericolosità sismica medio-alta (per frequenza ed intensità dei fenomeni), da una vulnerabilità molto elevata (per fragilità del patrimonio costruito esistente) e da un'esposizione altissima (per densità abitativa e valore del patrimonio storico-artistico esposto).

L'elevato rischio sismico della Penisola, in termini di vittime, danni alle costruzioni e costi attesi, è testimoniato dai pesanti effetti indotti dagli ultimi eventi sismici (Friuli, 1996; Umbria e Marche, 1998; Molise, 2002; L'Aquila, 2009; Emilia, 2012; Italia Centrale, 2016; Isola d'Ischia, 2017) e dagli ingenti danni osservati sul patrimonio edilizio esistente (Figura 1).

La complessità del problema spinge ad affrontare la valutazione del rischio sismico attraverso un approccio multidisciplinare che prenda in considerazione non soltanto l'aspetto naturale del fenomeno (*Hazard*) ma anche le condizioni legate all'impatto di un determinato evento sismico sulla società e alla capacità della stessa di rispondere in modo opportuno (*Preparedness*), recuperando in tempi brevi le sue funzioni (*Resilience*) (Alexander, 2005; Villagran De Leon, 2006).

Quanto sopra sottolinea chiaramente la necessità di definire strategie idonee di gestione territoriale, finalizzate alla mitigazione del rischio sismico. L'integrazione dei risultati di osservazione e previsione del danno atteso potrebbe infatti risultare fondamentale per consentire una pianificazione sistematica di strategie preventive di mitigazione del rischio (Del Colombo et al., 2015).

La stima della vulnerabilità sismica delle costruzioni esistenti, con particolare riferimento alle costruzioni storiche in muratura, rappresenta



Figura 1. Tipici meccanismi di danno di edifici in muratura osservati nei centri storici di: (a) Poggio Picenze, sisma aquilano del 6 Aprile 2009; (b) Amatrice, evento sismico del Centro Italia del 24 Agosto 2016 (Menna et al., 2016); (c) Casamicciola, sisma dell'Isola d'Ischia del 21 Agosto 2017 (Azzaro et al., 2017).

quindi un passo fondamentale e, al tempo stesso, una sfida notevole a causa della natura e consistenza di questi edifici. La variabilità dei materiali utilizzati, la mancanza di conoscenze certe sulla storia delle strutture, sui sistemi costruttivi adottati e sulle proprietà costitutive dei materiali messi in opera e soprattutto le modifiche ed alterazioni verificatesi nel corso del tempo rendono infatti tali costruzioni piuttosto difficili da analizzare.

In letteratura esistono metodi specifici, ampiamente riconosciuti ed applicati (di natura empirica, analitica o numerica), finalizzati alla valutazione della vulnerabilità sismica delle strutture in muratura e della loro propensione al danneggiamento a seguito di un evento sismico con assegnate probabilità di occorrenza.

L'utilizzo di modelli analitici (Calvi, 1999; Doherty et al., 2002; D'Ayala and Speranza, 2003; Pagnini et al., 2011;) o numerici (Ramos e Lourenco, 2004; Giamundo et al, 2014; Mendes e Lourenco, 2014) può risultare molto efficace in tal senso. Il notevole sforzo computazionale connesso all'utilizzo di questi approcci e l'ampia densità di edifici collocati nelle zone a rischio spingono però

ad utilizzare metodologie semplificate, di natura empirica, basate su una valutazione speditiva e semplificata della capacità strutturale degli edifici indagati.

Tali metodi possono basarsi sull'osservazione dei danni indotti da eventi sismici occorsi su una determinata popolazione di edifici e sulla loro rielaborazione statistica in termini di Matrici di Probabilità di Danno (DPM) (Brando et al., 2017; Fiorentino et al., 2018), oppure sulla definizione di un indice di vulnerabilità sismica ottenuto tramite la valutazione qualitativa di una serie di fattori tipologico-strutturali e sulla definizione di potenziali scenari post-sisma, espressi in termini di curve di vulnerabilità o fragilità (Giovinazzi e Lagomarsino, 2004; Dolce et al. 2006; Ferreira et al., 2013).

L'insufficienza di informazioni reperibili ad ampia scala di osservazione comporta però notevoli difficoltà nell'applicazione di tali metodologie predittive e implica numerose incertezze nella stima della vulnerabilità sismica delle strutture esistenti.

In tale contesto si inserisce la scheda di I livello CARTIS, sviluppata nell'ambito del Progetto triennale ReLUIS 2014-2016, in collaborazione con il DPC, con il fine di indagare il panorama costruttivo nazionale, caratterizzando l'edilizia ordinaria e individuando le peculiarità tipologiche e strutturali di determinati contesti storici e territoriali (Zuccaro et al., 2015).

Attraverso una lettura critica dei dati raccolti mediante la compilazione della scheda CARTIS, la presente memoria si propone di indagare il patrimonio edilizio della Provincia di Caserta, individuando i principali caratteri tipologico-strutturali delle costruzioni in muratura (MUR).

La caratterizzazione delle tipologie MUR più ricorrenti nel territorio in analisi è stata in particolare condotta attraverso un approccio osservazionale, individuando elementi strutturali e parametri ritenuti significativi.

La valutazione della vulnerabilità sismica delle tipologie MUR è stata quindi eseguita facendo riferimento ad un modello empirico predittivo, basato sulla definizione di un indice di vulnerabilità globale per le strutture, calibrato sulla base delle indagini territoriali condotte in seguito al sisma aquilano del 6 Aprile 2009 (Brando et al., 2017; Rapone et al., 2018) e riadattato ai parametri forniti dalla scheda CARTIS.

I valori di vulnerabilità associati a ciascuna tipologia possono essere quindi utilizzati per definire possibili scenari di danno indotti da terremoti di differenti intensità sulle popolazioni di edifici oggetto di analisi.

## 2 EDIFICI IN MURATURA DELLA PROVINCIA DI CASERTA

### 2.1 Inquadramento territoriale

Lo studio proposto nella presente memoria è applicato a 8 comuni della Provincia di Caserta, selezionati tra quelli analizzati dal gruppo di ricerca nell'ambito del succitato progetto. I comuni selezionati sono in particolare:

1. Caiazzo;
2. Castel Campagnano;
3. Castello del Matese;
4. Gioia Sannitica;
5. Liberi;
6. Piedimonte Matese;
7. Pontelatone;
8. Ruviano.

La distribuzione territoriale dei comuni indagati e la zonazione sismica del territorio della Provincia di Caserta secondo l'O.P.C.M. n. 3274 (2003) sono riportati in Figura 2.

La percentuale di edifici in muratura presenti nei comuni analizzati è invece riportata in Figura 3, con riferimento ai dati forniti dal 15° censimento ISTAT (2011).

In particolare, secondo le stime ISTAT, la percentuale di edifici in muratura varia tra il 44.92 e il 64.36% per i comuni di Piedimonte Matese e Pontelatone, tra il 64.37 e l'81.70% per Caiazzo, Castello del Matese, Gioia Sannitica e Liberi e tra l'81.71 e il 100% per i comuni di Castel Campagnano e Ruviano.

### 2.2 Caratterizzazione tipologica degli edifici MUR operata attraverso la scheda CARTIS

In linea con la procedura CARTIS, per ciascuno dei comuni elencati nel precedente paragrafo sono state riconosciute delle zone comunali omogenee (definite Comparti), caratterizzate da specifiche peculiarità storiche, urbanistiche e costruttive. Per ogni comparto individuato, sono state in seguito identificate le tipologie in muratura (MUR) o in cemento armato (CAR) prevalenti.

In Tabella 1 sono indicate in particolare le percentuali di edifici MUR identificate nei comparti indagati. Come è possibile notare, un'ampia percentuale di edifici MUR (variabile tra il 70 e il 100%) è stata individuata nei centri storici dei comuni (e delle rispettive frazioni) in esame.

In Tabella 2 sono elencate le principali caratteristiche tipologico-strutturali individuate negli edifici MUR analizzati (con le frequenze relative ottenute mediante la compilazione della scheda CARTIS).

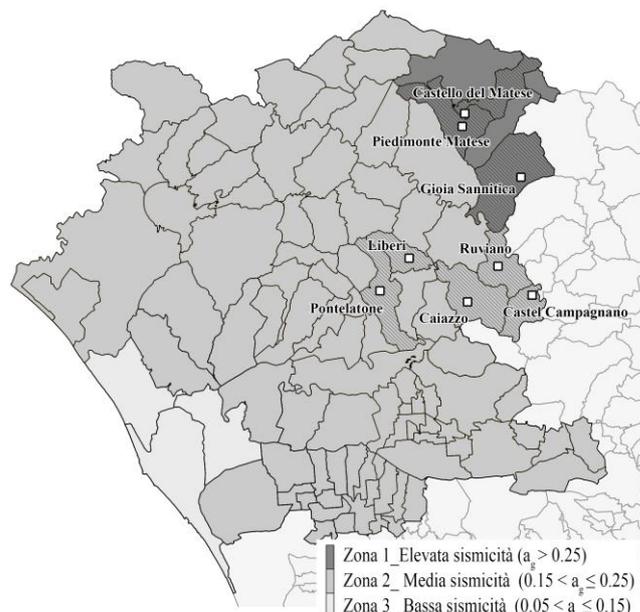


Figura 2. Inquadramento territoriale e classificazione sismica attuale dei comuni della Provincia di Caserta (O.P.C.M. n. 3274/2003).

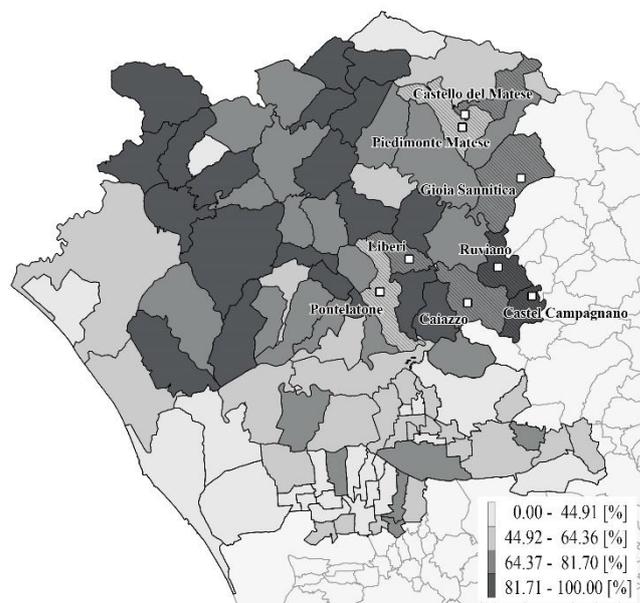


Figura 3. Percentuale di edifici in muratura ad uso residenziale nei comuni della Provincia di Caserta (15° censimento ISTAT (2011)).

Come è possibile notare:

1. gli edifici MUR oggetto di analisi sono caratterizzati da un ridotto numero di piani (3 - compreso piano interrato - nel 70% dei casi);
2. l'età della costruzione è per la maggior parte *Ante 1860* (per il 66% degli edifici);
3. la muratura è in prevalenza regolare, in pietra squadrata senza ricorsi (54% dei casi);
4. i solai sono prevalentemente in legno con mezzane (deformabili; 26%), semirigidi

del tipo SAP (23%), rigidi in c.a. con travetti prefabbricati (23% degli edifici);

5. le volte (per la maggior parte del tipo a botte - 49%) sono presenti principalmente ai piani terra (49% dei casi);
6. le strutture miste (telai in c.a. su muratura) sono presenti nel 43% dei casi;
7. le coperture sono per lo più a falde inclinate (100%) in legno (91%);
8. gli interventi strutturali (se presenti) sono principalmente di tipo locale (74% dei casi).

Gli edifici tipici individuati nei comuni casertani indagati sono mostrate in Figura 4.

Tabella 1. Percentuale di edifici MUR individuati nei comparti dei comuni indagati.

Comune	Comparti	[%] MUR
Caiazzo	- Centro storico	- 100% MUR
	- Zona di espansione	- 20% MUR
	- Zona agricola	- 40% MUR
	- Centro storico	- 100% MUR
	- San Giov. e Paolo	- 20% MUR
	- Zona di espansione	- 20% MUR
Castel Camp.	- Ceserano	- 20% MUR
	- Zona A	- 100% MUR
	- Zona B	- 90% MUR
	- Zona C	- 10% MUR
	- Zona A Squille	- 100% MUR
Castello del Mat.	- Zona B Squille	- 90% MUR
	- Centro storico	- 95% MUR
Gioia Sannitica	- Periferia	- 5% MUR
	- Centro storico	- 70% MUR
Liberi	- Frazioni	- 60% MUR
	- Liberi	- 80% MUR
Piedim. Matese	- Cese	- 80% MUR
	- Villa	- 80% MUR
	- Merangeli	- 80% MUR
	- Profeti	- 80% MUR
	- Centro storico	- 100% MUR
Pontelat.	- Zona di espansione	- 20% MUR
	- Zona agricola	- 50% MUR
	- Centro storico	- 100% MUR
	- Treglia	- 100% MUR
	- Savignano	- 100% MUR
	- Casalicchio	- 100% MUR
Ruviano	- Funari	- 100% MUR
	- Marzi	- 100% MUR
	- Centro storico	- 100% MUR
	- Alvignanello	- 100% MUR
	- Zona rurale	- 50% MUR

La caratterizzazione delle tipologie MUR ricorrenti nel territorio indagato è stata quindi eseguita partendo dall'individuazione delle tipologie murarie più frequenti, considerando in aggiunta la frequenza di ulteriori parametri ritenuti significativi (ad es. tipi di orizzontamenti; presenza di muratura a sacco e di elementi trasversali di collegamento tra i paramenti murari;

Tabella 2. Caratterizzazione degli edifici MUR individuati nei comuni indagati (parametri CARTIS).

Fattore	Caratteristiche	[%]
Numero di piani	- 2 piani	- 11%
	- <b>3 piani</b>	- <b>70%</b>
	- 4 piani	- 17%
	- 5 piani	- 2%
Età della costruz.	- <b>Ante 1860</b>	- <b>66%</b>
	- 1919-1945	- 13%
	- 1946-1961	- 4%
	- 1962-1971	- 11%
Caratt. muratura	- 1982-1986	- 6%
	- <b>Regolare_Pietra squadr. senza ricorsi</b>	- <b>54%</b>
	- Regolare_Pietra squadr. con ricorsi	- 11%
	- Irregolare_Pietra arrot. senza ricorsi	- 9%
	- Irregolare_Pietra grezza senza ricorsi	- 26%
Caratt. solai	- Rigidito_In c.a. a travetti prefabbricati	- 23%
	- Rigidito_In lat.-cem. gettato in opera	- 4%
	- Semirigidito_In ferro e tavelloni	- 11%
	- Semirigidito_SAP	- 23%
	- <b>Deformabile_In legno con mezzane</b>	- <b>26%</b>
Presenza volte	- Deformabile_Legno con tav. singolo	- 11%
	- Nessuna info.	- 2%
	- Assenza di volte	- 30%
	- <b>Al piano terra</b>	- <b>49%</b>
Caratt. volte	- Ai piani intermedi	- 19%
	- Nessuna info.	- 2%
	- <b>Volte a botte</b>	- <b>49%</b>
Strutture miste	- V. a botte + lunette	- 2%
	- Volte a crociera	- 17%
	- Assenti	- 30%
	- Nessuna info.	- 2%
Forma copertura	- <b>c.a. (o altre strutt. intel.) su mur.</b>	- <b>43%</b>
	- Mur. con ampliam. in pianta in c.a.	- 15%
	- Mur. perim. e pilastri interni in c.a.	- 11%
Materiale copertura	- Assenti	- 32%
	- <b>Falde inclinate</b>	- <b>100%</b>
Interventi strutturali	- <b>Legno</b>	- <b>91%</b>
	- Acciaio	- 9%
	- <b>Interventi locali</b>	- <b>74%</b>
	- Miglioram. sismico	- 17%
	- Assenza di interventi	- 9%

presenza di volte; presenza di strutture miste e di parti aggiunte in c.a.; tipologia di copertura; presenza di interventi strutturali).

Sulla base delle frequenze riscontrate sono state individuate 4 tipologie MUR ricorrenti (i.e. MUR1, MUR2, MUR3 e MUR4), rappresentanti rispettivamente l'11%, il 54%, l'8% e il 26% del campione indagato.



Figura 4. Edifici MUR individuati nei comuni di Caiazzo (a), Castel Campagnano (b), Castello del Matese (c), Gioia Sannitica (d), Liberi (e), Piedimonte Matese (f), Pontelatone (g) e Ruviano (h).

I criteri di caratterizzazione tipologica degli edifici indagati, con riferimento alle frequenze dei caratteri prevalenti e secondari, sono riportati nelle Tabelle 3, 4, 5 e 6.

Tabella 3. Caratterizzazione della tipologia MUR1.

Parametro	Caratteristiche	[%]
Caratt. muratura	- <b>Regolare_Pietra squadr. con ricorsi</b>	-100%
Muratura a sacco	- Presente	- 100%
Caratt. solai	-Semirigido_SAP	- 100%
Caratt. volte	- Assenza di volte	- 100%
Strutture miste	- Mur. perim. e pilastri interni in c.a. - <b>Assenti</b>	- 30 % - <b>70%</b>
Forma copertura	- Falde inclinate	-100%
Materiale copertura	- <b>Legno</b> - c.a.	- <b>80%</b> - 20%
Interventi strutturali	- <b>Interventi locali</b> - Miglioram. sismico	- <b>80%</b> - 20%
Comuni	- Castel Campagnano	- 100%

Tabella 4. Caratterizzazione della tipologia MUR2.

Parametro	Caratteristiche	[%]
Caratt. muratura	- <b>Regolare_Pietra squadr. senza ricorsi</b>	-100%
Muratura a sacco	- Presente - <b>Assente</b> - Nessuna info.	- 12% - <b>44%</b> - 44%
Caratt. solai	- <b>Rigido_ In c.a. a travetti prefabbricati</b> - Rigido_ In c.a. a soletta piena - Rigido_ In lat.-cem. gettato in opera - Semir._ In ferro e tav. - Semirigido_SAP - Deformabile_ In legno con mezzane - Def._ Legno con tav. - Nessuna info.	- <b>33%</b> - 6% - 6% - 9% - 19% - 20% - 5% - 2%
Caratt. volte	- <b>Al piano terra</b> - Ai piani intermedi - Assenza di volte	- <b>44%</b> - 32% - 24%
Strutture miste	- c.a su mur. - Mur. con ampliam. in pianta in c.a. - <b>Assenti</b>	- 7% - 2% - <b>91%</b>
Forma copertura	- <b>Falde inclinate</b> - Singola falda - Terrazzo non prat.	- <b>94%</b> - 3% - 3%
Materiale copertura	- <b>Legno</b> - Acciaio - c.a.	- <b>83%</b> - 11% - 6%
Interventi strutturali	- Interventi locali - Miglioram. Sismico - <b>Assenza di interv.</b>	- 42% - 10% - <b>48%</b>
Comuni	- Caiazzo - Castello del Matese - Gioia Sannitica - Liberi - Piedimonte Matese - Pontelatone	- 32% - 8% - 8% - 20% - 8% - 24%

Tabella 5. Caratterizzazione delle tipologie MUR3.

Parametro	Caratteristiche	[%]
Caratt. muratura	- <b>Irregolare_Pietra arrot. senza ricorsi</b>	-100%
Muratura a sacco	- Presente - Assente	- 50% - 50%
Caratt. solai	- Rigido_ In c.a. a travetti prefabbricati - <b>Semir. In ferro e tav.</b> - Deformabile_ Con tr. in ferro e voltine - Deformabile_ Legno con tav. singolo	- 15% - <b>35%</b> - 17% - 33%
Caratt. volte	- Al piano terra - <b>Assenti</b>	- 35% - <b>65%</b>
Strutture miste	- c.a. su mur. - <b>Assenti</b>	- 25% - <b>75%</b>
Forma copertura	- <b>Falde inclinate</b> - Terrazzo non prat.	- <b>85%</b> - 15%
Materiale copertura	- <b>Legno</b> - c.a. - acciaio	- <b>80%</b> - 15% - 5%
Interventi strutturali	- Interventi locali - <b>Miglioram. Sismico</b>	- 20% - <b>80%</b>
Comuni	- Gioia Sannitica - Piedimonte Matese	- 50% - 50%

Tabella 6. Caratterizzazione delle tipologie MUR4.

Parametro	Caratteristiche	[%]
Caratt. muratura	- <b>Irregolare_Pietra grezza senza ricorsi</b>	-100%
Muratura a sacco	- <b>Presente</b> - Assente - Nessuna info.	- <b>38%</b> - 15% - 46%
Caratt. solai	- Rigido_ In c.a. a travetti prefabbricati - Semir. In ferro e tav. - Deformabile_ Con tr. in ferro e voltine - <b>Deformabile_ In legno con mezzane</b> - Deformabile_ Legno con tav. singolo - Nessuna info.	- 3% - 12% - 3% - <b>54%</b> - 20% - 8%
Caratt. volte	- <b>Al piano terra</b> - Ai piani intermedi - Assenti - Nessuna info	- <b>62%</b> - 8% - 23% - 7%
Strutture miste	- c.a su mur. - Mur. con ampliam. in pianta in c.a. - Assenti	- 13% - 3% - 84%
Forma copertura	- <b>Falde inclinate</b> - Singola falda - Terrazzo praticab. - Nessuna info	- <b>82%</b> - 9% - 5% - 4%
Materiale copertura	- <b>Legno</b> - Acciaio - Nessuna info	- <b>94%</b> - 2% - 4%
Interventi strutturali	- Interventi locali - Miglioram. Sismico - <b>Assenza di interv.</b>	- 24% - 23% - <b>53%</b>
Comuni	- Caiazzo - Castel Campagnano - Liberi - Piedimonte Matese - Ruviano	- 15% - 8% - 38% - 15% - 23%

In Tabella 7 sono quindi riportati i caratteri prevalenti delle tipologie MUR1, MUR2, MUR3 e MUR4 individuate.

Tabella 7. Caratteri prevalenti delle tipologie MUR indagate.

Tipologia	Caratteristiche
<b>MUR1</b>	- Regolare_Pietra squadr. con ricorsi - Muratura a sacco presente - Solaio Semirigido_ SAP - Volte assenti - Strutture miste assenti - Copertura a falde inclinate in legno - Interventi strutturali locali
<b>MUR2</b>	- Regolare_Pietra squadr. senza ricorsi - Muratura a sacco assente - Solaio rigido_ In c.a. a travetti prefabbricati - Volte al piano terra - Strutture miste assenti - Copertura a falde inclinate in legno - Assenza di interventi strutturali
<b>MUR3</b>	- Irregolare_Pietra arrot. senza ricorsi - Solaio semirigido_ In ferro e tavelloni - Volte assenti - Strutture miste assenti - Copertura a falde inclinate in legno - Interventi di miglioramento sismico
<b>MUR4</b>	- Irregolare_Pietra grezza senza ricorsi - Muratura a sacco presente - Solaio deformabile_ In legno con mezzane - Volte al piano terra - Strutture miste assenti - Copertura a falde inclinate in legno - Assenza di interventi strutturali

### 3 VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA

#### 3.1 Modello predittivo

La valutazione della vulnerabilità sismica delle tipologie MUR precedentemente individuate è stata eseguita facendo riferimento ad un modello empirico predittivo, calibrato sulla base delle indagini territoriali condotte in seguito al sisma aquilano del 6 Aprile 2009, basato sulla definizione di un indice di vulnerabilità globale per le strutture e sulla valutazione di specifici parametri di vulnerabilità (Brando et al., 2017; Rapone et al., 2018).

Tali parametri sono stati ridotti nella presente memoria sulla base dei dati forniti dalla scheda CARTIS (Tabella 8).

Ad ogni parametro sono associati specifici indicatori di fragilità e presidi antisismici, in grado di modificare la risposta strutturale della tipologia considerata, favorendo o contrastando lo sviluppo di uno specifico meccanismo di collasso (di I o II modo).

Ad esempio, l'attivazione dei meccanismi di I modo (parametro P3) risulta fortemente influenzata dall'eventuale presenza di aperture nelle pareti trasversali, di coperture spingenti, di travi di colmo mal collegate o di archi e volte, oppure dall'elevata snellezza delle pareti.

Per lo stesso parametro, l'eventuale presenza di contrafforti, catene, connessioni tra le pareti trasversali, diatoni (nelle pareti a doppia cortina), connessioni con la copertura o con gli orizzontamenti risulta notevolmente influente nell'inibizione degli stessi meccanismi fuori piano.

In accordo con il modello proposto, l'indice di vulnerabilità  $i_v$  (con  $0 \leq i_v \leq 1$ ) è quindi calcolato attraverso l'Equazione 1:

$$i_v = \frac{1}{6} \cdot \frac{\sum_{k=1}^m \rho_k \cdot (v_{k,f} - v_{k,p})}{\sum_{k=1}^m \rho_k} + 0.5 \quad (1)$$

dove:

- $m$  è il numero totale dei possibili parametri di vulnerabilità;
- $\rho_k$  è un coefficiente (variabile tra 0 e 1.5) definito sulla base dell'influenza che il parametro  $k$  ha sulla stabilità globale della struttura;
- $v_{k,f}$  è il punteggio assegnato al generico indicatore di fragilità attribuito al parametro  $k$ , variabile tra 0 (in caso di influenza nulla) e 3 (in caso di influenza massima);
- $v_{k,p}$  è il punteggio assegnato al generico presidio antisismico attribuito al parametro  $k$ , variabile tra 0 (in caso di efficacia nulla) e 3 (in caso di efficacia massima).

### 3.2 Applicazione al campione indagato

Il modello descritto è stato quindi applicato alle tipologie MUR individuate.

Tabella 8. Parametri di vulnerabilità per le tipologie MUR.

Param.	Descrizione
[P1]	Posizione
[P2]	Numero di piani
[P3]	Meccanismi di I modo
[P4]	Meccanismi di II modo
[P5]	Archi
[P6]	Volte
[P7]	Orizzontamenti
[P8]	Elementi spingenti
[P9]	Strutture aggiunte
[P10]	Scale
[P11]	Irregolarità
[P12]	Elementi non strutturali

Per ogni parametro elencato in Tabella 8, i punteggi  $v_{k,f}$  e  $v_{k,p}$  ottenuti sono stati rielaborati statisticamente (e rappresentati graficamente in Figura 5 e in Figura 6) in modo da valutare l'influenza dei presidi e delle vulnerabilità indagate.

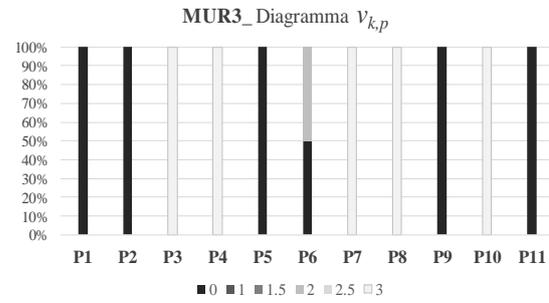
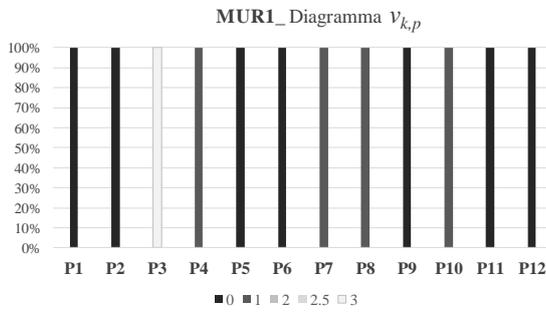
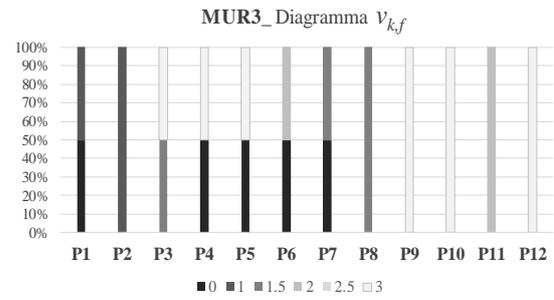
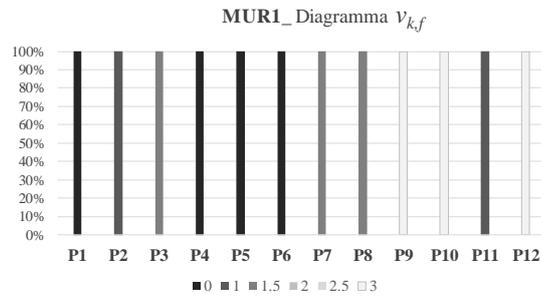
Dalla Figura 5 emerge, ad esempio, come nella MUR1 il valore  $v_{k,f}$  sia pari a 3 per P9, P10 e P12, indicando una massima influenza degli indicatori di fragilità nei parametri considerati (*Strutture aggiunte, Scale e Elementi non strutturali*). Allo stesso modo, per la medesima MUR1 il valore  $v_{k,p}$  è pari a 3 per P3, indicando una massima efficacia dei presidi antisismici nel parametro *Meccanismo di I modo*.

Gli indici di vulnerabilità  $i_v$  calcolati attraverso l'Equazione 1 per ogni tipologia MUR individuata sono quindi riportati in Tabella 9.

Per ogni tipologia sono stati inoltre definiti i valori minimi e massimi di  $i_v$ , in modo da considerare la variabilità connessa alla presenza di caratteristiche strutturali differenti (come elencato nelle Tabelle 3, 4, 5 e 6).

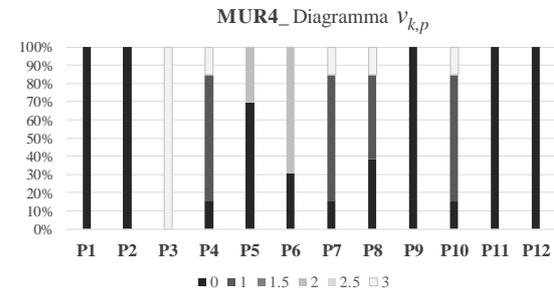
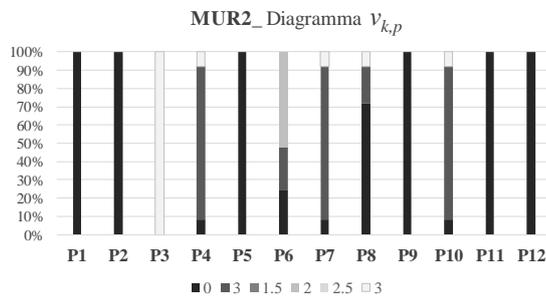
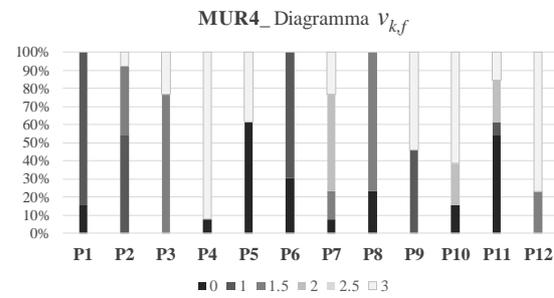
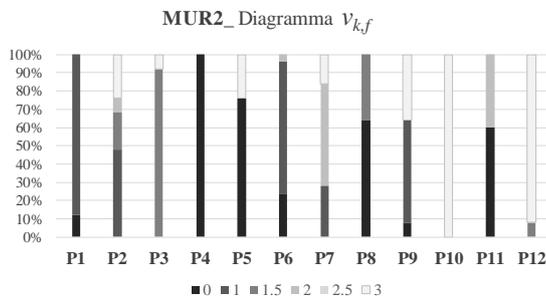
Tabella 9. Indici di vulnerabilità  $i_v$  per le tipologie MUR indagate.

Tipologia	$i_v$	$i_v [max]$	$i_v [min]$
MUR1	<b>0.559</b>	0.559	0.559
MUR2	<b>0.579</b>	0.677	0.465
MUR3	<b>0.545</b>	0.559	0.532
MUR4	<b>0.600</b>	0.624	0.496



a)

a)



b)

b)

Figura 5. Punteggi  $v_{k,f}$  e  $v_{k,p}$  per i parametri elencati in Tabella 8. Tipologie MUR1 (a) e MUR2 (b).

Figura 6. Punteggi  $v_{k,f}$  e  $v_{k,p}$  per i parametri elencati in Tabella 8. Tipologie MUR3 (a) e MUR4 (b).

## 4 CONCLUSIONI

La memoria presenta un'indagine condotta sul patrimonio edilizio in muratura (MUR) della Provincia di Caserta. Attraverso una lettura critica dei dati raccolti mediante la compilazione della scheda CARTIS, sviluppata nell'ambito del Progetto ReLUIIS, lo studio proposto individua i principali caratteri tipologico- strutturali degli edifici ed esegue una valutazione della vulnerabilità sismica degli stessi attraverso un modello predittivo di tipo empirico.

I risultati ottenuti consentono di delineare le seguenti conclusioni principali:

1. l'utilizzo della scheda CARTIS, quale strumento finalizzato alla caratterizzazione dell'edificato ordinario, consente di collezionare un'ampia gamma di dati relativi al patrimonio edilizio esistente in muratura, rilevato nel territorio dei comuni indagati;
2. tali dati possono essere utilizzati per l'applicazione di modelli predittivi semplificati, finalizzati alla valutazione della vulnerabilità sismica delle tipologie costruttive individuate;

- le informazioni raccolte nel database CARTIS e i dati ottenuti attraverso le analisi di vulnerabilità delle tipologie individuate possono essere impiegati per lo sviluppo di analisi di rischio dei territori indagati e per la definizione di potenziali scenari di danno attesi nelle aree oggetto di indagine.

## RINGRAZIAMENTI

Il presente studio è stato sviluppato nell'ambito del Progetto Esecutivo Convenzione DPC/ReLUIS 2019-2021, WP2 - Inventario delle tipologie strutturali ed edilizie esistenti (CARTIS).

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Alexander, E.D., 2005. Vulnerability to landslides. *Landslide risk assessment*, John Wiley, 175-198.
- Azzaro, R., Del Mese, S., Martini, G., Paolini, S., Screpanti, A., Verrubbi, V., Tertulliani, A., 2017. QUEST- Rilievo macrosismico per il terremoto dell'isola di Ischia del 21 agosto 2017, *Rapporto interno*.
- Brando, G., De Matteis, G., Spacone, E., 2017. Predictive model for the seismic vulnerability assessment of small historic centres: Application to the inner Abruzzi Region in Italy. *Engineering structures*, **153**, 81-96.
- Calvi, G., 1999. A displacement-based approach for vulnerability evaluation of classes of buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, **3**, 411-438.
- Del Colombo, F., De Matteis, G., Campitiello, F., 2015. Censimento del danno e delle tipologie costruttive nei Piani di Ricostruzione dei comuni del cratere sismico aquilano di Cocullo, Goriano Sicoli, Gagliano Aterno e San Demetrio ne' Vestini. *Atti del XVI Convegno Anidis - L'Ingegneria Sismica in Italia*, L'Aquila 13-09/17-09, 2015, Memoria n. 2171.
- Doherty, K.T., Griffith, M., Lam, N., Wilson, J., 2002. Displacement-based seismic analysis for out-of-plane bending of unreinforced masonry walls. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **31**, 833 - 850.
- Dolce, M., Kappos, A., Masi, A., Penelis, G., Vona, M., 2006. Vulnerability assessment and earthquake damage scenarios of the building stock of Potenza (Southern Italy) using Italian and Greek methodologies. *Engineering Structures*, **28** (3), 357-371.
- D'Ayala, D., Speranza, E., 2003. Definition of Collapse Mechanisms and Seismic Vulnerability of Historic Masonry Buildings. *Earthquake Spectra*, **19**.
- Ferreira, T., Vicente, R., Mendes da Silva, J.A.R., Varum, H., Costa, A., 2013. Seismic vulnerability assessment of historical urban centres: Case study of the old city centre in Seixal, Portugal. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **11**, 1-21.
- Fiorentino, G., Forte, A., Pagano, E., Sabetta, F., Baggio, C., Lavorato, D., Nuti, C., Santini, S., 2018. Damage patterns in the town of Amatrice after August 24th 2016 Central Italy earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **16** (3), 1399-1423.
- Giamundo, V., Sarhosis, V., Lignola, G.P., Sheng, Y., Manfredi, G., 2014. Evaluation of different computational modelling strategies for the analysis of low strength masonry structures. *Engineering Structures*, **73**, 160 - 169.
- Giovinazzi, S., Lagomarsino, S., 2004. A macroseismic method for the vulnerability assessment of buildings. *13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*. 1-6 August 2004, Vancouver, B.C., Canada.
- ISTAT, 2011. 15° Censimento della popolazione e degli edifici.
- Mendes, N., Lourenco, P., 2014. Sensitivity analysis of the seismic performance of existing masonry buildings. *Engineering Structures*, **80**, 137-146.
- Menna, C., Frascadore, R., Moroni, C., Lignola, G.P., De Martino, G., Salzano, A., Di Ludovico, M., Prota, A., Manfredi, G., Cosenza, E., 2016. Rapporto fotografico relativo ai danni subiti da alcuni edifici a seguito del sisma del Centro Italia del 2016. <http://www.reluis.it>.
- O.P.C.M. 20 marzo 2003, n. 3274. Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica.
- Pagnini, C.L., Vicente, R., Lagomarsino, S., Varum, H., 2011. A mechanical model for the seismic vulnerability assessment of old masonry buildings. *Journal Earthquakes and Structures*, **2**, 25-42.
- Ramos, L., Lourenco, P., 2004. Modeling and vulnerability of historical city centers in seismic areas: A case study in Lisbon. *Engineering Structures*, **26**, 1295-1310.
- Rapone D., Brando G., Spacone, E., De Matteis G., 2018. Seismic vulnerability assessment of historic centers: description of a predictive method and application to the case study of scanno (Abruzzi, Italy). *International Journal of Architectural Heritage*, **12** (7-8), 1171-1195.
- Villagrán de León, J.C., 2006. Vulnerability. A conceptual and methodological review. *UNU-EHS*, **4**, United Nations University.
- Zuccaro, G., Dolce, M., De Gregorio, D., Speranza, E., Moroni, C., 2015. La scheda CARTIS per la caratterizzazione tipologico-strutturale dei comparti urbani costituiti da edifici ordinari. Valutazione dell'esposizione in analisi di rischio sismico. 34° Convegno Nazionale GNGTS, Trieste.