

La Rocca Ariostesca di Castelnuovo Garfagnana. Analisi strutturale ed intervento di recupero

Giovanni BECATTINI, Michele BETTI, Duccio CAPONI, Maurizio ORLANDO

SOMMARIO

La memoria tratta dell'analisi strutturale e del progetto di rinforzo della Rocca Ariostesca di Castelnuovo Garfagnana. Le analisi e gli interventi di rinforzo strutturali si inseriscono nel quadro più generale del progetto di riqualifica della costruzione, che prevede la realizzazione di un polo museale dedicato all'Ariosto e alla Garfagnana del '500. Il progetto, finanziato tramite il Piano Stralcio Cultura e Turismo FSC 2014/2020, intervento n. 30 "Ducato Estense", nasce dalla forte volontà del Comune di Castelnuovo Garfagnana di rilanciare e valorizzare i luoghi storici del territorio. L'idea progettuale è stata affidata al Prof. Ing. Arch. Marco Dezzi Bardeschi, recentemente scomparso, e la progettazione degli interventi strutturali all'Ing. Giovanni Becattini.

1. INTRODUZIONE

La Rocca Ariostesca (Figura 1), simbolo della città di Castelnuovo Garfagnana (LU), è una struttura difensiva risalente all'XI secolo che deve il suo odierno nome al fatto di aver ospitato, nel periodo dal 1522 al 1525, il poeta Ludovico Ariosto in qualità di Governatore dell'allora provincia estense di Garfagnana. Essa si inserisce all'interno di un ristretto contesto urbano, poco distante dal torrente Turrite Secca, ed è da sempre al centro per posizione ed importanza della storica cittadina di Castelnuovo.

Sotto il profilo architettonico la Rocca presenta la caratteristica forma delle costruzioni difensive medioevali: robuste mura con piccole torri agli angoli, oltre ad un torrione quadrato al centro (di epoca successiva al periodo di costruzione della cinta muraria verso sud).



Fig. 1. La Rocca Ariostesca. Vista dalla centrale via Vittorio Emanuele.

ABSTRACT

The paper discusses the structural analysis and retrofitting design of Rocca Ariostesca in Castelnuovo Garfagnana. Structural analysis and strengthening design are part of a major project aimed at the rehabilitation of the fortress. The project involves the creation of a new museum dedicated to Ariosto and Garfagnana in the sixteenth century. The project was funded by the Development and Cohesion Fund FSC 2014/2020, "Culture and Tourism" Operational Plan, intervention no. 30 "Ducato Estense", and it was born from the strong will of the Municipality of Castelnuovo Garfagnana to enhance Garfagnana historic sites. The rehabilitation project was entrusted to Prof. Ing. Arch. Marco Dezzi Bardeschi, who died recently, and the structural retrofitting design to Eng. Giovanni Becattini.

Le vicende costruttive della Rocca, e le modifiche apportate alla struttura medioevale originaria, si intersecano, inevitabilmente, con le vicissitudini storiche di Castelnuovo Garfagnana.

Prime modifiche di un certo rilievo si registrano nel corso del XIII secolo. Tra i vari cambiamenti, subiti durante il periodo di dominazione lucchese, si possono ricordare l'allargamento dell'intera cinta muraria urbana (operato da Castruccio Castracani degli Antelminelli), oltre alla realizzazione dell'imponente torre posta al centro della Rocca, e successivamente impreziosita dall'orologio civico per volontà di Paolo Guinigi (Figura 2).

Nel 1429, durante i conflitti tra le confinanti potenze di Firenze e Lucca, Castelnuovo Garfagnana si sottomette volontariamente agli Estensi, liberandosi dal dominio lucchese, e diventando il capoluogo dell'allora neonata provincia estense della Garfagnana. Gli estensi lasciarono larga autonomia alla Garfagnana demandandone il controllo ad un governatore. Uno dei primi fu proprio Ludovico Ariosto che nominato dal Duca Alfonso I d'Este arrivò a Castelnuovo nel 1522 per rimanervi fino al 1525. È proprio in questo periodo che l'Ariosto scriverà la seconda revisione dell'*Orlando Furioso*.

La ricostruzione puntuale e continua nei secoli delle vicende storiche che hanno attraversato la storia della Rocca Ariostesca (ed in particolare fasi di costruzione e di mutazione d'uso) è purtroppo resa difficile, se non impossibile, a causa degli ingenti danni subiti durante i bombardamenti dell'ultima guerra



Fig. 2. Veduta della Rocca da Piazza Umberto I (foto primi anni del '900).

■ La Rocca Ariostesca di Castelnuovo Garfagnana. Analisi strutturale ed intervento di recupero.

(Figura 3). Al dopoguerra risale proprio l'ultima, radicale ed impegnativa, campagna di interventi sulla Rocca, operata sotto la guida dell'allora Soprintendente Piero Sanpaolesi. Questa campagna copre un periodo di quasi quindici anni che va dall'immediato dopoguerra al 1959 (anno nel quale è stata notificata come Monumento Nazionale ai sensi della Legge 1089 del 1939). L'archivio lucchese della Soprintendenza offre in tal senso una ricca mole di preziosi documenti, i quali consentono in modo sufficientemente esaustivo di ripercorrere l'intera cronologia del cantiere di ricostruzione a partire dall'8 luglio del 1946 quando l'ingegner Lepri, allora dirigente dell'Ufficio del Genio Civile di Lucca, pubblica il bando di gara per i "Lavori di riparazione della Rocca Ariostesca in Castelnuovo Garfagnana" per l'importo di 5 milioni di lire.

(cfr. Relazione al Progetto di Restauro della Rocca e la creazione di un polo museale su Ludovico Ariosto e la Garfagnana del '500 del Prof. Ing. Arch. Marco Dezzi Bardeschi).



Fig. 3. Danni subiti dalla Rocca a seguito dei bombardamenti della seconda Guerra Mondiale.

È, infine stato da poco completato un progetto di riqualifica della Rocca, diretto dal Prof. Dezzi Bardeschi e curato nella parte strutturale dall'Ing. Giovanni Becattini, per la realizzazione di un Polo museale dedicato all'Ariosto e alla Garfagnana del '500 mediante la realizzazione di allestimenti che riprendono il tema delle opere del poeta e del poema "L'Orlando Furioso". Il gruppo di professionisti, coordinati dal Prof. Marco Dezzi Bardeschi, che ha vinto il bando di gara per la progettazione e direzione lavori del Restauro della Rocca è composto anche da: Arch. Roberto Bruni (coprogettazione architettonica), Arch. Bernadette Cerruto (progetto di conservazione), Arch. Giacomo Dolfi (coprogettazione allestimenti museali), Arch. Aldo Gherardi e Arch. Marco Lenzi dello Studio Associato di Architettura Gherardi-Lenzi (coordinamento generale e coordinamento sicurezza in corso di esecuzione), Ing. Paolo Mannelli (progettazione impianti e prevenzione incendi). Il *concept* del progetto consiste in un allestimento che vedrà l'installazione di totem multimediali interattivi e proiettori olografici che utilizzeranno le pareti interne della Rocca come tele sulle quali rappresen-

tare le scene del poema portando così l'ospite ad immergersi nel mondo dell'Ariosto con un approccio nuovo e tecnologico ma al tempo stesso diretto. Tra gli interventi che verranno eseguiti per rendere gli spazi fruibili agli ospiti è prevista l'installazione di due ascensori: uno vicino l'ingresso e l'altro all'interno della torre principale, per consentire l'accesso ai piani superiori e, in particolar modo, per favorire l'accesso alla terrazza panoramica posta sulla torre dell'orologio. Sarà inoltre realizzata una passerella per completare il percorso museale (Figura 4) che si svilupperà all'interno dell'atrio centrale collegando i due estremi della Rocca e dando la possibilità agli ospiti di compiere un giro completo del complesso. Un altro intervento atto a garantire una completa fruizione degli ambienti da parte del pubblico sarà la realizzazione di due coperture in acciaio e vetro (Figura 5).



Fig. 4. Concept Prof. Dezzi Bardeschi: ascensore e passerella.

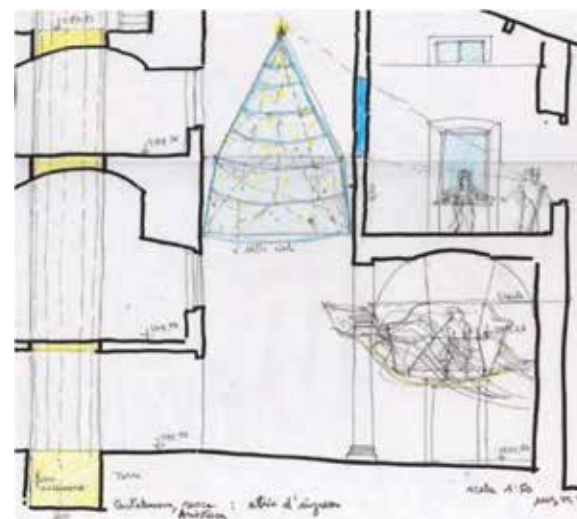


Fig. 5. Concept Prof. Dezzi Bardeschi: copertura acciaio e vetro corte interna

La memoria illustra alcuni degli elementi che hanno concorso alla progettazione degli interventi a carattere strutturale, e si articola in tre parti.

Nella prima parte viene presentata l'attività svolta finalizzata ad acquisire una idonea conoscenza formale e materica della struttura (dettagli costruttivi, tipologia delle murature e degli orizzontamen-

ti, quadri fessurativi, connessioni tra i setti murari, etc.). Tale indagine è di fondamentale importanza in quanto il progettista, leggendo la struttura dell'edificio storico-monumentale come un documento materico da studiare con attenzione, cercando di comprenderne ad analizzarne le trasformazioni subite nel tempo, deve necessariamente formarsi un quadro complessivo della costruzione al fine di poter individuare eventuali carenze strutturali e le successive strategie di analisi (oltre a possibili interventi di riabilitazione strutturale la cui efficacia deve essere valutata analiticamente nelle fasi successive). Un adeguato livello di conoscenza si raggiunge, innanzitutto, tramite un'attenta ispezione visiva che permetta di individuare le caratteristiche architettoniche ed eventuali cause di degrado (in atto, o preesistenti). Una mirata, e per quanto possibile esaustiva, campagna di indagini sperimentali in-situ permette di ricavare informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali: operando nel quadro definito dalle vigenti normative, sono state stimate le caratteristiche meccaniche in base alle indicazioni contenute nelle NTC (2008), normativa vigente al momento dello sviluppo del progetto. Le informazioni acquisite in questa fase sono anche state di indirizzo per la scelta della scala di modellazione (Caponi, 2018). Data la specifica geometria strutturale, una modellazione con elementi solidi del complesso strutturale è stata ritenuta utile al fine di riprodurre con sufficiente affidabilità le specifiche architettoniche e strutturali del complesso. La seconda parte riguarda lo svolgimento delle verifiche di sicurezza degli elementi strutturali della Rocca Ariostesca, sia nei confronti dei carichi gravitazionali sia in relazione all'azione sismica. In questa fase è stato fatto riferimento, oltre che alle NTC (2008) anche alle "Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale allineate alle NTC 2008" (DPCM 2011). Esse rappresentano un elemento innovativo nel panorama Europeo individuando un percorso di conoscenza e di valutazione della sicurezza nei confronti delle azioni sismiche opportunamente adattato alle esigenze e peculiarità del patrimonio culturale. La terza ed ultima parte del lavoro presenta alcuni interventi di consolidamento della struttura individuati sulla base delle problematiche, delle carenze strutturali e delle necessità di utilizzo emerse nelle precedenti fasi di indagine ed analisi. Tali interventi, pur non mirando a riportare la struttura entro i livelli di sicurezza stabiliti dalla norma per le nuove costruzioni (operazione spesso non possibile se non addirittura inappropriata per gli edifici storico-monumentali), sono volti ad incrementare la capacità di resistenza della struttura per azioni orizzontali, rimuovendo alcune delle criticità osservate.

2. ANALISI CONOSCITIVA

2.1 Rilievo geometrico

La Rocca Ariostesca presenta i tipici caratteri distintivi delle fortificazioni medioevali.

Globalmente essa si sviluppa su quattro livelli fuori terra. Ha murature perimetrali di tipologia a sacco con un nucleo compatto e non disgregato. In prossimità della base dell'ala sud, tali pareti raggiungono uno spessore complessivo di circa 3.50 m rastremandosi in elevazione sino ad uno spessore di circa 70/80 cm (al pari dello spessore delle pareti interne).

Al centro della Rocca è presente una torre di altezza circa 25 m e sezione di base 8.15×7.25 m. Lo spessore delle pareti della torre alla base è circa 2 m (Figura 6).

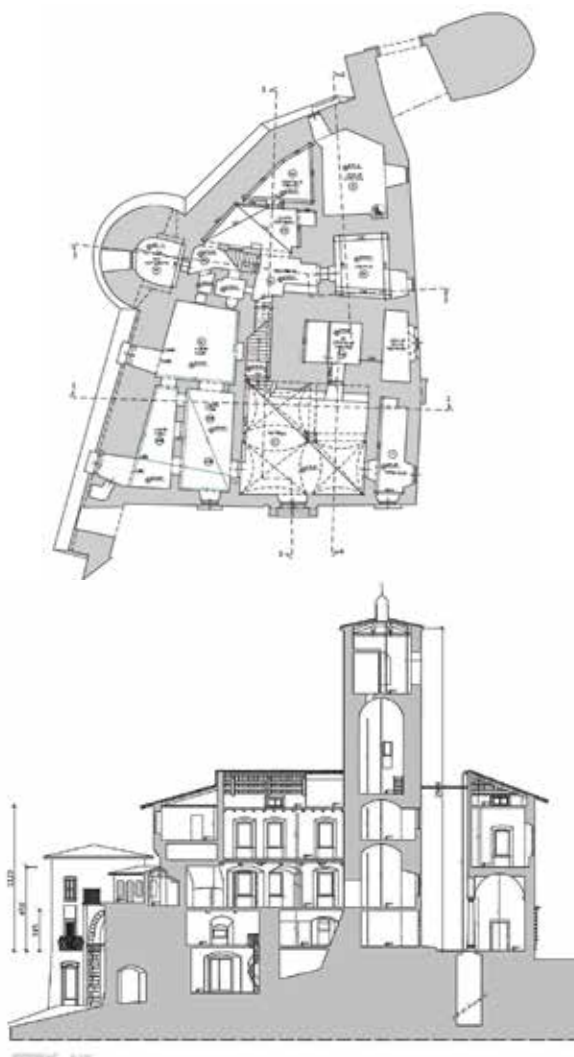


Fig. 6. Pianta piano primo e sezione.

Gli orizzontamenti sono costituiti da volte a crociera e a botte al piano terra, e da solai in legno a doppia e semplice orditura nei piani superiori (in parte ricostruiti nel periodo successivo alla Seconda Guerra Mondiale). Le coperture, costituite da una doppia orditura di travi più assito, sono state completamente ricostruite in legno lamellare in occasione di un recente intervento eseguito negli anni 2015-2016.

■ La Rocca Ariostesca di Castelnuovo Garfagnana. Analisi strutturale ed intervento di recupero.

2.2. Campagna diagnostica

Nel caso di un edificio esistente, ed ancor più nel caso di un edificio storico a carattere monumentale quale la Rocca Ariostesca, la conoscenza e la conseguente caratterizzazione dello stato di fatto sono di primaria importanza al fine di ottenere un modello strutturale affidabile e robusto capace di riprodurre il comportamento sotto i carichi di progetto.

Il processo di conoscenza applicato alla struttura ha previsto una serie articolata, ed al contempo diffusa, di indagini sperimentali che ha sostanzialmente interessato la quasi totalità degli elementi strutturali. Sono state effettuate prove sia sulla muratura sia sulle strutture lignee dei solai e la campagna diagnostica è stata eseguita adottando prevalentemente tecniche non distruttive e/o moderatamente intrusive in modo da non pregiudicare l'integrità storico-architettonica della struttura.

Per la muratura sono state eseguite videoendoscopie, prove con martinetti piatti sulle principali mura, prelievo di provini lapidei per prove di schiacciamento e prove sulle malte. Sulle travi in legno

sono state eseguite analisi resistografiche, analisi a vista secondo la norma UNI 11119:2004 per l'orditura principale dei solai e analisi morfo-anatomiche tramite microscopia ottica.

La campagna diagnostica (di cui si riporta una sintesi in Figura 7), grazie anche all'esecuzione di saggi mirati, ha consentito di rilevare i dettagli costruttivi, di classificare le tipologie di muratura e le tipologie di orizzontamenti comprese le relative caratteristiche meccaniche.

Nel complesso la campagna di indagini ha consentito di raggiungere il livello di verifiche in-situ estese. Si riassumono nel seguito alcuni elementi costituenti la campagna diagnostica, discutendone i risultati emersi.

Indagini videoendoscopiche

L'indagine videoendoscopica ha consentito di rilevare la presenza di una muratura caratterizzata da un conglomerato formato da conci di pietra con spigoli arrotondati abbastanza regolari. Per le murature a sacco è stata rilevata la presenza di uno strato compreso tra i paramenti esterno ed interno con caratteristiche di buona coesione e compattezza, sempre costituita da elementi lapidei allettati con malta, mai sciolti.

Non sono state peraltro riscontrate, fatto salvo alcuni isolati casi, lesioni diffuse sulla struttura, coerentemente con il buon stato di conservazione generale.

Prove con martinetti piatti singoli e doppi

Prove con martinetti piatti sono state utilizzate per misurare il valore delle tensioni in esercizio (martinetto singolo) e dei moduli di elasticità della muratura (martinetto doppio) in sette punti diversi della struttura: n. 4 prove sono state effettuate al piano terra, n. 2 al piano primo e n. 1 prova al piano secondo. L'asportazione dell'intonaco nelle posizioni di prova (per un'area di circa un metro quadrato) ha inoltre consentito di rilevare la tessitura muraria. I risultati delle prove sono riassunti in Tabella 1. Le prove indicate come MC3 e MC5 sono state interrotte per insufficiente contrasto del martinetto superiore con la muratura.



Fig. 7. Localizzazione aree di prova piano terra.

n° Prova	Stato tensionale (MPa)	Tensione alle prime fessurazioni (MPa)	Tensione MAX raggiunta (MPa)	Modulo elastico E (MPa)
MC1	0,44	Fessurazioni non rilevate	4,46	1944,8
MC2	0,66	2,27	2,95	1021
MC3	0,05	fessurazioni non rilevate	1,87	849,5
MC4	0,37	2,85	3	4035,8
MC5	0,13	1,86	2,09	651,5
MC6	0,12	fessurazioni non rilevate	5,57	4099,6
MC7	0,2	1,87	3,19	4971,1

Tabella 1. Risultati prove con martinetti piatti.

Prove sulla malta

La valutazione delle proprietà meccaniche delle malte è stata eseguita impiegando un penetrometro per malta serie RSM. La prova consiste nell'infiggere un ago di acciaio nel giunto di malta di una muratura con un prefissato numero di colpi. La misura della penetrazione di tale ago consente, mediante opportune correlazioni (la resistenza che la malta offre all'avanzamento dell'ago è sostanzialmente proporzionale alla resistenza meccanica del materiale), di stimare le proprietà meccaniche e lo stato di conservazione della malta.

Le prove sono state eseguite attraverso 10 battute del penetrometro su almeno tre aghi nel giunto di malta, distanziati tra loro di almeno 100 mm. Per ogni ago è stata eseguita la misura dell'infissione attraverso un comparatore con precisione del centesimo di millimetro.

Nella **Tabella 2** si riportano sia il valore di penetrazione medio calcolato per ciascuna prova sia il valore di resistenza a compressione ricavato dalla curva di correlazione.

n° Prova	Ubicazione	Penetrazione media	Resistenza a compressione malta (N/mm ²)
SM1	Muratura est. p.primo	43	<0,4
SM2	Muratura int. p.primo	28	<0,4
SM3	Muratura est. p.primo	25	<0,4
SM4	Muratura est. p.primo	41	<0,4
SM5	Muratura int. p.primo	29	<0,4
SM6	Muratura int. P. secondo	23	<0,4
SM7	Muratura int. p.secondo	28	<0,4
SM8	Muratura est. p.secondo	25	<0,4
SM9	Muratura est. p.terra	39	<0,4
SM10	Muratura est. p.terra	28	<0,4
SM11	Muratura int. p.terra	34	<0,4
SM12	Muratura est. p.terra	22	<0,4
SM13	Muratura est. p.terra	22	<0,4
SM14	Muratura est. p.terra	56	<0,4
SM15	Muratura est. p.terra	18	<0,4

Tabella 2. Risultati prove con penetrometro RSM.

Complessivamente i giunti di malta indagati hanno restituito valori di penetrazione media compresi tra 18 e 56 mm, con una resistenza stimata che risulta per gran parte delle indagini minore o uguale a 0.4 N/mm². Fra tutte le prove, solamente l'indagine SM15 ha restituito un valore di resistenza a compressione superiore, e pari a 0.7 N/mm². È tuttavia da osservare che la stima della resistenza è ottenuta per via indiretta, essendo basata su una correlazione empirica

(Del Monte & Vignoli 2008) ed è pertanto possibile che i valori di resistenza a compressione possano venire sovrastimati o sottostimati in funzione anche di condizioni al contorno presenti durante la prova (umidità del materiale, presenza di degrado, ecc.). Nell'insieme si può comunque osservare come i valori di resistenza della malta si presentino mediamente bassi.

Prove sugli elementi lapidei

Durante le operazioni in sito sono state individuate n. 7 aree di muratura distribuite ai piani terra e primo della Rocca e per ogni area sono stati eseguiti n. 3 prelievi di materiale lapideo, per un totale di n. 21 elementi lapidei prelevati. Tali elementi lapidei sono stati dapprima sottoposti in laboratorio ad una classificazione dal punto di vista macroscopico e litologico e poi sottoposti a prove di compressione ai sensi della UNI EN 1926:2007.

Le prove di schiacciamento hanno dato i valori riportati nel seguito, che denotano le ottime caratteristiche a compressione del materiale lapideo, come era facilmente ipotizzabile essendo esso prevalentemente costituito da ciottoli di arenaria provenienti dai vicini torrenti Turrite Secca e Fiume Serchio: massa volumica $\gamma = 2475.2 \div 2743.4 \text{ kg/m}^3$ e resistenza a compressione (medie su tre provini) $f_m = 60.4 \div 136.0 \text{ N/mm}^2$.

Analisi morfo-anatomica sulle travi in legno

L'analisi morfo-anatomica sulle travi in legno è stata eseguita in riferimento alle indicazioni riportate nella UNI 11119:2004 impiegando una troncatrice metallografica Remet Micromet-M, una pulitrice metallografica Remet LS2 ed un microscopio ottico polarizzatore Nikon Alphaphot 2 - POL (N interno S-11). Le prove morfo-anatomiche hanno consentito di individuare le seguenti specie lignee: Abete Rosso, Abete Bianco e Castagno. Sono state inoltre eseguite prove resistografiche sulle travi lignee dei locali del secondo piano finalizzate alla determinazione dell'eventuale stato di degrado. I punti di indagine, nei singoli elementi lignei, sono stati scelti in modo da indagare la parte più soggetta a degrado della struttura (come ad esempio la zona più vicina alle finestre o la parte di trave prossima alla parete) o la parte più sollecitata (come ad esempio la zona centrale con massimo momento flettente).

La distribuzione dei valori di resistenza evidenzia una certa omogeneità tra le resistografie eseguite. Nella maggior parte delle indagini si riscontrano in media valori di resistenza variabili medio bassi. In più punti i valori scendono sotto i 20 N ad indicare uno stato di conservazione non ottimale. Nelle indagini R49 e R51 i valori di resistenza sono addirittura inferiori a 10 N, e restituiscono un giudizio pessimo, denotando la presenza di scarsissima resistenza probabilmente

■ La Rocca Ariostesca di Castelnuovo Garfagnana. Analisi strutturale ed intervento di recupero.

dovuta a carie del legno.

Si osserva in termini generali che le travi hanno mediamente caratteristiche medio-buone nelle zone centrali, mentre sono di caratteristiche peggiori nelle zone di appoggio (innesti nelle murature).

Prove di carico su solai

Sono state, infine, effettuate prove di carico (Figura 8) sui solai mediante l'applicazione di una cisterna zavorrata di dimensioni 6x3 m, posizionata in modo da coprire una superficie di 18 m². Il carico applicato è stato di 3 kN/m².



Fig. 8. Posizionamento flessimetri nella sala delle volte.

Le prove sono state condotte eseguendo un solo ciclo di carico e scarico, ed il carico è stato applicato secondo tre passi crescenti mantenuti costanti fino alla completa stabilizzazione della deformazione. Per il carico massimo il tempo di attesa è stato protratto a sessanta minuti.

La misura delle deformazioni è stata eseguita per mezzo di flessimetri posizionati in mezzzeria e all'appoggio della trave più sollecitata.

Nel complesso le prove eseguite sono state le seguenti:

- Prova 1 stanza 7: l'abbassamento massimo è stato registrato sul punto di acquisizione n°1, posto al centro della trave n°4 e centrato rispetto all'impronta di carico, ed è stato di 13.23 mm; l'abbassamento residuo è stato pari a 1.05 mm;
- Prova 2 stanza 10: l'abbassamento massimo è stato registrato sul punto di acquisizione B posto al centro della trave n°3, decentrato rispetto all'impronta di carico, ed è stato di 11.93 mm, l'abbassamento residuo è stato pari a 2.13 mm;
- Prova 3 stanza 11: l'abbassamento massimo si è registrato sul punto di acquisizione D posto al centro

della trave n° 1, decentrato rispetto all'impronta di carico, ed è stato di 28.87 mm, il cedimento residuo è stato pari a 8.58 mm.

Prima di eseguire le prove è stata fatta una valutazione preliminare dei livelli di spostamento atteso per garantire in corso di prova che non ci fossero comportamenti anomali; per ogni passo di carico è stata confrontata la misura sperimentale con il valore teorico (valutato con lo schema di semplice appoggio). La Tabella 3 confronta gli abbassamenti massimi rilevati con quelli calcolati (in corrispondenza del sovraccarico di 3 kN/m²).

Si osserva in generale un comportamento delle travi, sotto i carichi applicati, con sviluppo della deformata di tipo lineare, denotando che le deformazioni rimangono in campo elastico.

Prova di carico	u prova (mm)	u calcolato (mm)
1	13,23	12,6
2	11,93	11,9
3	28,87	28,8

Tabella 3. Confronto tra freccia teorica e freccia sperimentale.

2.3. Stima delle caratteristiche meccaniche dei materiali

I risultati della campagna di indagine sono stati impiegati, oltre che per caratterizzare per quanto possibile la tecnologia costruttiva (connessioni tra gli elementi strutturali, tipologia muraria, etc.) per stimare i parametri meccanici sia degli elementi murari sia degli elementi lignei come di seguito riassunto.

Strutture murarie

Per la valutazione delle caratteristiche delle murature è stato impiegato il metodo IQM ("Indice di qualità muraria"; Borri & De Maria 2018). Il metodo consiste nell'analizzare la rispondenza degli elementi alla cosiddetta regola dell'arte, oltre alle modalità con cui si manifestano il degrado ed il dissesto.

In base alla direzione dell'azione sollecitante che viene considerata (carichi verticali, azione orizzontale nel piano, azione orizzontale fuori piano) il metodo conduce a tre indici numerici (variabili ciascuno fra 0 e 10): un valore IQM_v per le azioni verticali, un valore IQM_{FP} per le azioni orizzontali ortogonali al pannello ed un valore IQM_{NP} per le azioni orizzontali agenti nel piano medio del pannello. Attraverso i tre indici IQM è possibile classificare la muratura in una categoria di appartenenza in relazione al suo comportamento strutturale atteso, da buono (A) a scadente (C).

Per la valutazione dell'IQM vengono assegnati diversi punteggi rappresentativi della presenza (R), della parziale presenza (PR) o dell'assenza (NR) di alcuni

parametri caratteristici della corretta ed efficace messa in opera della muratura: i cosiddetti parametri della *regola dell'arte* (Tabella 4).

L'indice IQM viene ricavato attraverso le seguenti espressioni:

$$IQM_V = RE \cdot EL_V (OR_V + P \cdot D_V + F \cdot EL_V + S \cdot G_V + D \cdot EL_V + MA_V)$$

$$IQM_{FP} = RE \cdot EL_{FP} (OR_{FP} + P \cdot D_{FP} + F \cdot EL_{FP} + S \cdot G_{FP} + D \cdot EL_{FP} + MA_{FP})$$

$$IQM_{NP} = RE \cdot EL_{NP} (OR_{NP} + P \cdot D_{NP} + F \cdot EL_{NP} + S \cdot G_{NP} + D \cdot EL_{NP} + MA_{NP})$$

Ciò che distingue i tre valori di IQM è il diverso peso attribuito ai parametri della regola dell'arte per le tre situazioni di carico.

Per attribuire un giudizio sulla qualità della muratura della Rocca Ariostesca è stata considerata una porzione di parete omogenea, di forma parallelepipeda di dimensioni adeguate, sulla quale sono stati valutati tutti i sette parametri riportati in Tabella 4. La classificazione in categorie, in base al punteggio ottenuto, è effettuata secondo la Tabella 5.

Nel caso della muratura tipo della Rocca (Figura 9), questa è risultata essere classificabile in categoria B per azioni verticali e orizzontali complanari, e in categoria C per azioni orizzontali.

Mediante l'IQM è così possibile pervenire ad una stima dei parametri meccanici della muratura. Tale stima è effettuata mediante una correlazione con le tipologie murarie previste nella Circolare (2009) (rif. Tab C8A.2.1). Le correlazioni sono le seguenti, e forniscono i parametri f_m , τ_0 e E:

resistenza a compressione f_m (MIN, MED, MAX):

$$f_{m,MIN} = 95.262e^{0.2297(IQM_V)}$$

$$f_{m,MED} = 133.77e^{0.2135(IQM_V)}$$

$$f_{m,MAX} = 172.63e^{0.2031(IQM_V)}$$

modulo E (MIN, MED, MAX):

$$E_{MIN} = 551.19e^{0.1804(IQM_V)}$$

$$E_{MED} = 689.67e^{0.1736(IQM_V)}$$

$$E_{MAX} = 828.23e^{0.1688(IQM_V)}$$

resistenza a taglio τ_0 (MIN, MED, MAX):

$$\tau_{0,MIN} = 1.9257e^{0.2178(IQM_{NP})}$$

$$\tau_{0,MED} = 2.5064e^{0.2068(IQM_{NP})}$$

$$\tau_{0,MAX} = 3.0897e^{0.1992(IQM_{NP})}$$

Il modulo G si può stimare tramite la relazione:

$$G = 0.4 E$$

	Azioni verticali			Azioni fuori piano			Azioni nel piano		
	NR	PR	R	NR	PR	R	NR	PR	R
OR. Orizzontalità dei filari	0	1	2	0	1	2	0	0.5	1
P.D. Presenza di diatoni/ingranamento trasversale	0	1	1	0	1.5	3	0	1	2
F.EL. Forma degli elementi resistenti	0	1.5	3	0	1	2	0	1	2
S.G. Sfalsamento dei giunti verticali/ingranamento nel piano	0	0.5	1	0	0.5	1	0	1	2
D.EL. Dimensione degli elementi resistenti	0	0.5	1	0	0.5	1	0	0.5	1
MA. Qualità della malta/efficace contatto fra elementi/zeppe	0	0.5	2	0	0.5	1	0	1	2
RE.EL. Resistenza degli elementi	0.3	0.7	1	0.5	0.7	1	0.3	0.7	1

Tabella 4. Punteggi da attribuire ai parametri della regola dell'arte per IQM verticale (V), fuori piano (FP) e nel piano (NP).

Metodo dei punteggi (IQM)			
Categoria muraria	Tipo di azione		
	C	B	A
Azioni verticali (V)	$0 \leq IQM < 2.5$	$2.5 \leq IQM < 5$	$5 \leq IQM \leq 10$
Azioni orizzontali fuori dal piano (FP)	$0 \leq IQM \leq 4$	$4 < IQM < 7$	$7 \leq IQM \leq 10$
Azioni orizzontali nel piano (NP)	$0 \leq IQM \leq 3$	$3 < IQM \leq 5$	$5 < IQM \leq 10$

Tabella 5. Categoria Muratura IQM in base al punteggio.



Presenza filari orizzontali	1
presenza diatoni	0
Forma elementi esistenti	1.5
Sfalsamento giunti verticali	0.5
Dimensione elementi resistenti	0
Qualità della malta	0.5
Qualità elementi resistenti	1
IQM	3.5

Fig. 9. Muratura tipo della Rocca Ariostesca

■ La Rocca Ariostesca di Castelnuovo Garfagnana. Analisi strutturale ed intervento di recupero.

	(MPa)
$f_{m,min}$	2,13
$f_{m,med}$	2,82
$f_{m,max}$	3,51
E_{min}	1036,37
E_{med}	1266,25
E_{max}	1495,31

Tabella 6. Valori di f_m e E derivanti dalla valutazione dell'IQM.

La Tabella 6 riassume i valori stimati dei parametri meccanici per la muratura illustrata in Figura 9. I risultati della valutazione svolta con il metodo IQM sono allineati con i valori della Circolare (2009) per la tipologia di muratura presa in considerazione, sia dal punto di vista delle resistenze, sia dal punto di vista dei moduli elastici.

I valori caratteristici dei parametri a cui si perviene (che dovranno essere divisi per i rispettivi coefficienti di sicurezza e per il fattore di confidenza FC per ottenere le resistenze di progetto), considerando 3 diversi livelli di conoscenza LC1, LC2, LC3, sono riportati in Tabella 7.

Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno				
	E (N/mm ²)	f_m (N/mm ²)	τ_0 (N/cm ²)	Peso (kN/m ³)
LC1	1230	2	3.5	20
LC2	1230	2.5	4.3	20
LC3	1230	3	5.1	20

Tabella 7. Valori caratteristici dei parametri della muratura per ogni livello di conoscenza.

Strutture lignee

Grazie alle prove effettuate sono stati determinati la specie legnosa e lo stato di conservazione delle strutture dei solai. Nella maggior parte dei solai le travi sono costituite da legno di Castagno, mentre nei solai del sottotetto le travi sono di Abete.

Secondo la classificazione visiva effettuata con la norma UNI 11119:2004 emerge che la maggior parte delle travi ricadono nella Categoria 2.

La UNI 11119:2004 attribuisce per ogni classe e specie legnosa dei profili di resistenza basati sulle tensioni ammissibili. Per ricondursi ad un valore caratteristico tenendo conto delle tensioni ammissibili fornite dalla UNI 11119:2004 e quindi effettuare le verifiche secondo il metodo degli stati limite, è stata presa in considerazione la proposta di normativa "NICOLE" (Norme tecniche Italiane per la progettazione, esecuzione e collaudo delle Costruzioni di Legno). I valori ammissibili della resistenza possono essere desunti partendo dai valori caratteristici della resistenza e viceversa, secondo la formula seguente:

$$\sigma_A = f_k \frac{k_{mod}}{1.5 \gamma_M}$$

considerando che $\gamma_M = 1.5$ e $k_{mod} = 0.6-0.8$. Il rapporto che intercorre tra f_k resistenza caratteristica e σ_A tensioni ammissibili è di circa 3, tale coefficiente è stato applicato alle tensioni ammissibili fornite dalla tabella della UNI 11119:2004 per ricavare le resistenze caratteristiche che avessero un riscontro con quelle fornite dalla UNI EN 338:2016. Per effettuare le verifiche agli stati limite ultimi sono stati scelti i profili di resistenza per Castagno D24 e Abete C24 della UNI EN 338:2016.

3. ANALISI STRUTTURALI

Le "Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale" (DPCM 2011) individuano per lo sviluppo delle analisi sismiche tre diversi livelli di valutazione (LV) di crescente completezza così definiti:

- (LV1) Si impiega per le valutazioni della sicurezza sismica da effettuarsi a scala territoriale e consente la valutazione dell'azione sismica allo stato limite di interesse attraverso metodi semplificati, basati su un numero limitato di parametri geometrici e meccanici, o che utilizzano dati qualitativi;
- (LV2) Questo livello di valutazione, adottabile nei casi in cui siano previsti interventi di restauro che interessano singole parti della costruzione, prevede l'impiego di modelli locali riferiti a porzioni strutturalmente autonome della costruzione (macroelementi);
- (LV3) L'ultimo livello di valutazione interessa globalmente la costruzione, e può prevedere l'impiego di un modello strutturale globale quando ritenuto attendibile (specie in termini di parametri meccanici dei materiali). In alternativa un'analisi globale può essere svolta mediante un'estensiva applicazione dei modelli di analisi locale previsti per l'analisi LV2 purché applicati in modo generalizzato su tutti gli elementi della costruzione.

A prescindere dal percorso di conoscenza portato a compimento, viste le incertezze comunque esistenti, è stato fatto riferimento agli strumenti previsti dal secondo livello di valutazione (LV2), non essendo le informazioni sui parametri meccanici sufficienti per poter ritenere affidabili i risultati di un'analisi numerica globale non lineare. Peraltro, l'estesa casistica di modelli di secondo livello analizzati (analisi dei cinematismi di collasso), ha consentito di ottenere un quadro sufficientemente affidabile ed esaustivo del comportamento globale della Rocca Ariostesca.

3.1 Modellazione numerica

Sulla base di quanto specificato, lo sviluppo delle analisi strutturali è stato eseguito ricorrendo a due distinte modellazioni.

Un modello numerico, realizzato con la tecnica degli elementi finiti, dell'intero complesso strutturale è stato impiegato per effettuare le analisi sotto carichi verticali. Il modello, realizzato impiegando il codice agli elementi finiti ANSYS, è stato finalizzato ad indagare le condizioni statiche della struttura tramite l'analisi dello stato tensionale presente nei principali elementi. Tramite il codice Aedes PCM (www.aedes.it) sono state invece svolte le analisi relative ai cinatismi di collasso finalizzate ad investigare la risposta sotto azione sismica della struttura.

Modellazione FEM

La Rocca presenta peculiarità specifiche, come ad esempio una geometria articolata: presenza di orizzontamenti sfalsati, muri curvi e rastremati, presenza diffusa al piano terra di volte a crociera e a botte, mensole in pietra, che sorreggono alcuni elementi murari e la terrazza del secondo piano e muratu-

re perimetrali massive. Tutti questi sono elementi che debbono attentamente essere valutati e tenuti in conto, sia in termini di massa sia in termini di rigidezza, nel modello numerico. La Rocca è stata dunque modellata impiegando elementi solidi isoparametrici a otto nodi (sia per i setti murari sia per le volte). I solai lignei di copertura non sono stati modellati ed il carico trasmesso da questi alle pareti perimetrali è stato modellato tramite carichi concentrati.

La creazione del modello geometrico è stata effettuata tramite il software REVIT in modo tale da, mediante l'utilizzo di famiglie parametriche, semplificare le operazioni di costruzione della geometria, il tracciamento dei muri e l'impostazione automatica dei livelli di piano. L'inserimento delle volte è stato facilitato dalle famiglie parametriche adattive. Il modello così realizzato (Figura 10) è stato importato in ANSYS usando opportuni formati di scambio.

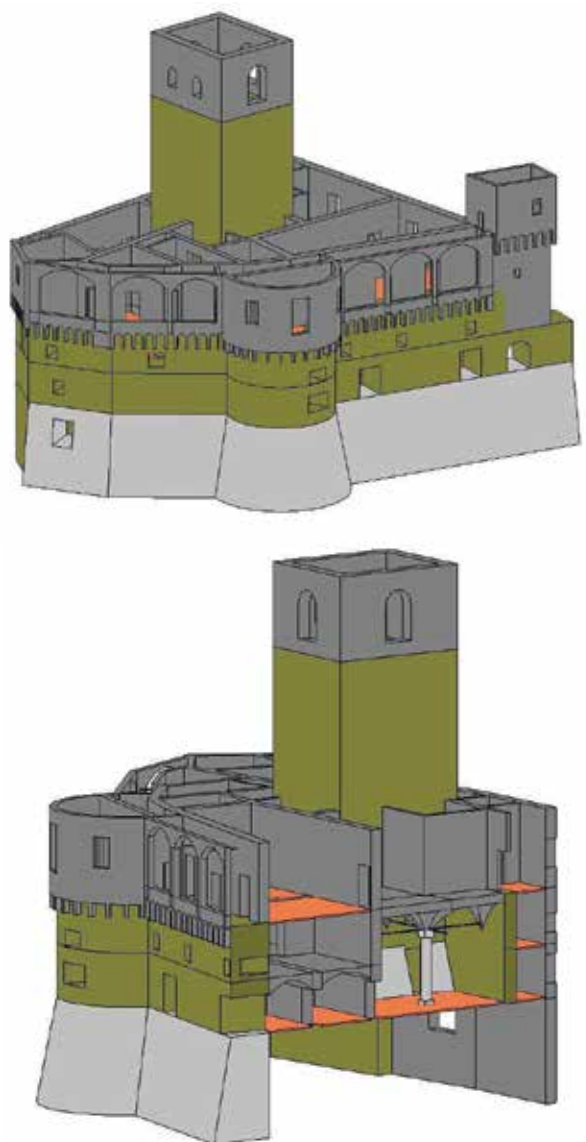


Fig. 10. Modello 3D REVIT

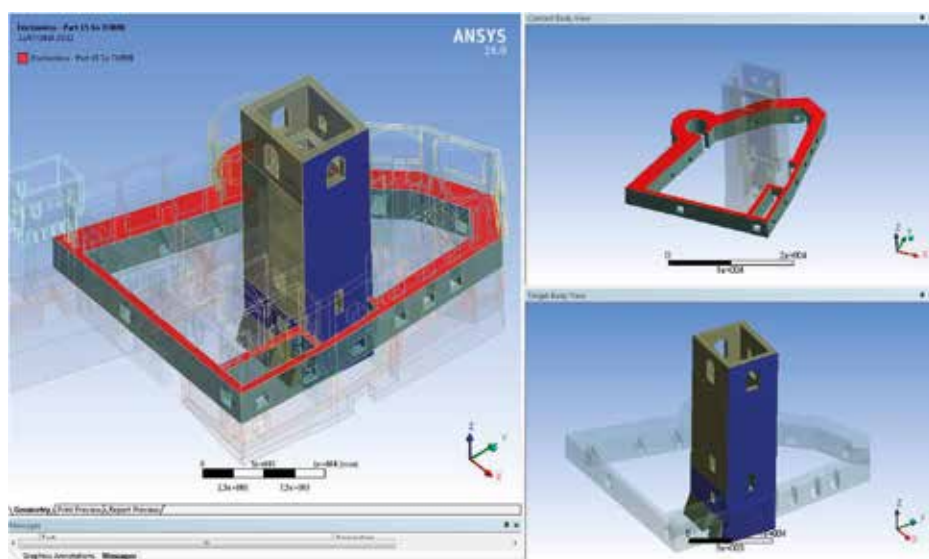
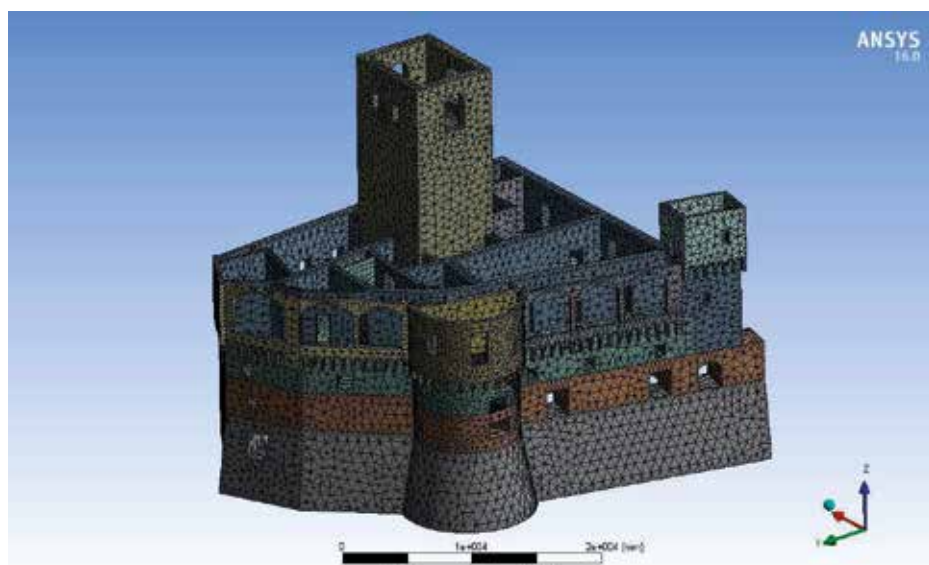


Fig. 11. Modello discretizzato in ambiente ANSYS

■ La Rocca Ariostesca di Castelnuovo Garfagnana. Analisi strutturale ed intervento di recupero.

Il modello ANSYS (Figura 11), impiegato per svolgere analisi statiche e dinamiche, è stato realizzato interamente con elementi solidi (SOLID 186 e SOLID 187), impiegando elementi di contatto (CONTA174) per gestire le connessioni tra i diversi gruppi di elementi. La dimensione massima degli elementi finiti è stata selezionata in 400 mm per avere un buon compromesso tra numero di elementi finiti (onere computazionale) e accuratezza della soluzione.

Modellazione PCM

Il codice PCM effettua una schematizzazione a telaio equivalente; nel caso in esame è stato utilizzato esclusivamente per l'analisi relativa ai cinatismi di collasso, che sono quelle più significative per edifici in muratura di questo genere.

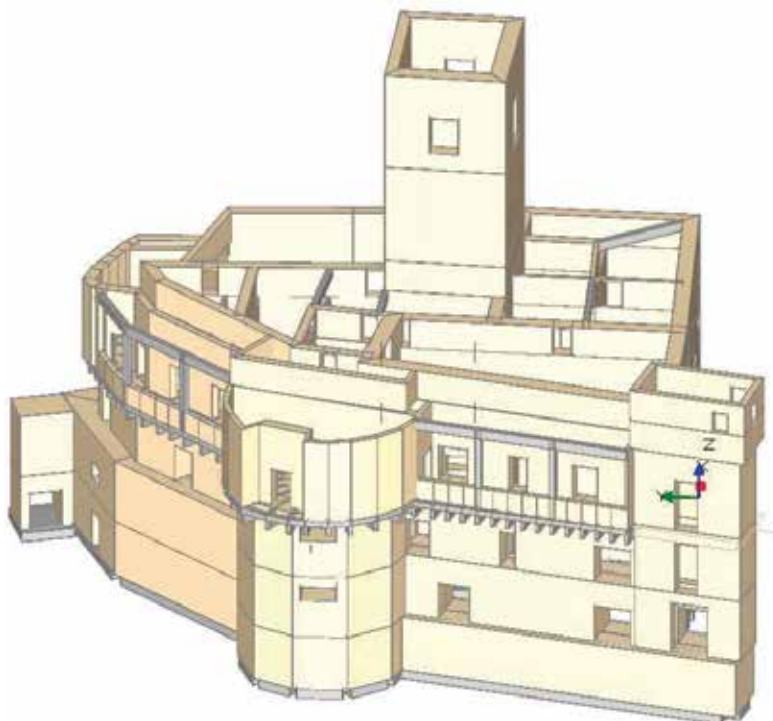


Fig. 12. Modellazione su PCM

3.2 Analisi per carichi verticali

Orizzontamenti

Sono state effettuate le verifiche degli orizzontamenti considerando per ogni tipologia di solaio la situazione più gravosa. Il sovraccarico d'uso fornito nella



Fig. 13. Solai di piano. Sx: Solaio doppia orditura con tavolato. Centro: Solaio doppia orditura con pannelle. Dx: Solaio semplice orditura con tavolato.

Tab. 3.1 delle NTC (2008) per edifici di categoria C3 (musei) è pari a 5 kN/m^2 tenendo conto della destinazione museale prevista dal progetto di riqualificazione della Rocca.

Le verifiche effettuate sui solai risultano essere soddisfatte per la totalità degli orizzontamenti costituiti da semplice orditura e tavolato situati al piano terzo, non soggetti a carico museale ma al solo accesso per la manutenzione, mentre per i solai del piano primo e secondo costituiti da doppia orditura con tavolato e con pannelle sono state riscontrate numerose criticità.

La copertura non è stata oggetto di verifica in quanto di recente oggetto di integrale sostituzione con travi in legno lamellare e tavolato.

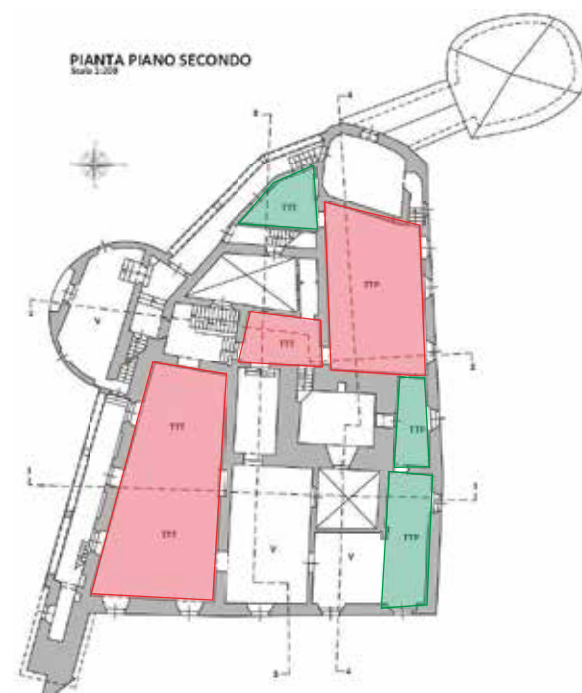


Fig. 14. Pianta piano secondo in rosso i solai non verificati, in verde i solai verificati.

Pareti murarie

Le verifiche sulle strutture murarie sono state condotte in termini di tensioni considerando lo stato limite SLU e valutando in termini comparativi per ogni livello di conoscenza (LC1, LC2, LC3) il tasso di sfruttamento del materiale. Per la validazione del modello è stato effettuato un confronto tra i risultati delle tensioni derivanti dal calcolo FEM e tensioni derivanti dal calcolo manuale.

Nel caso di LC2 e LC3 non si evidenziano criticità, mentre nel caso di LC1 si raggiunge un tasso di sfruttamento massimo pari al 119% con tensioni massime agenti alla base della torre pari a 0.58 MPa e nella parete Est, in corrispondenza dell'ingresso, pari a 0.55 MPa .

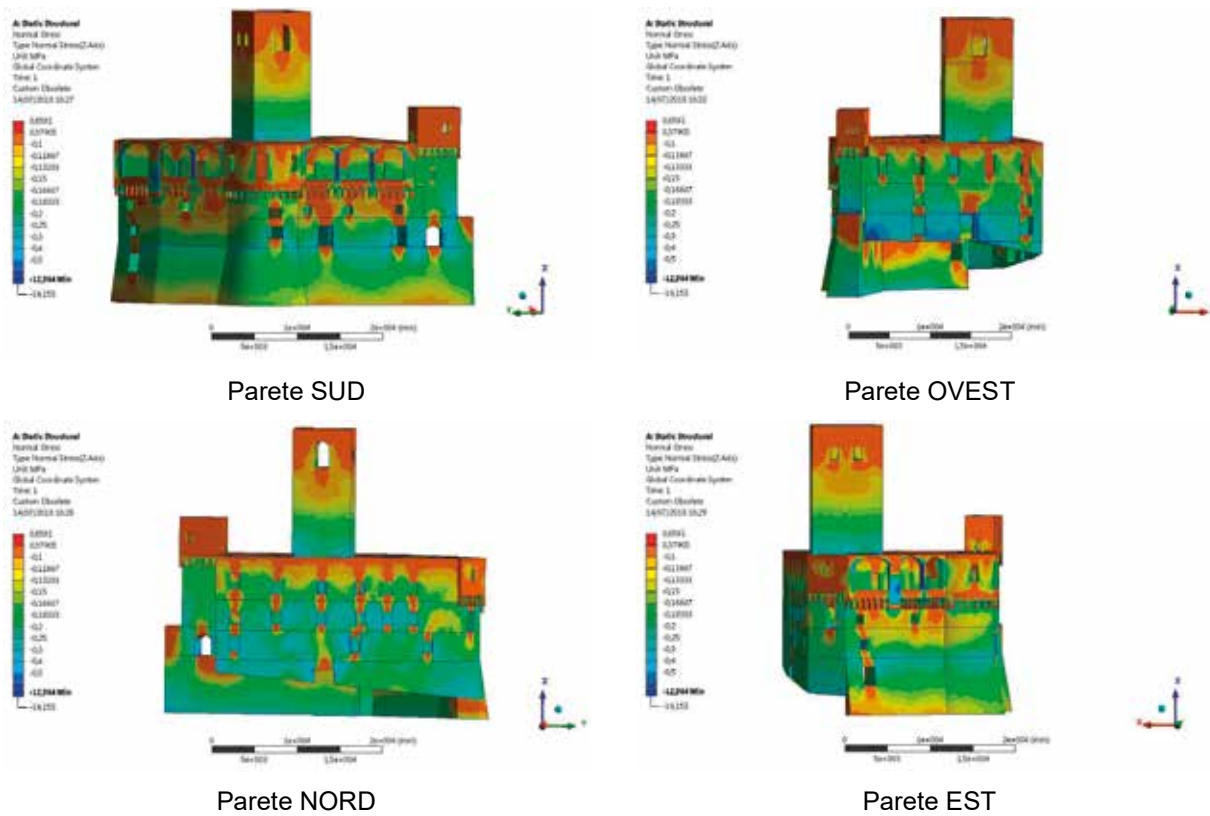


Fig. 15. Mappe tensionali (tensione verticale) SLU, ANSYS.

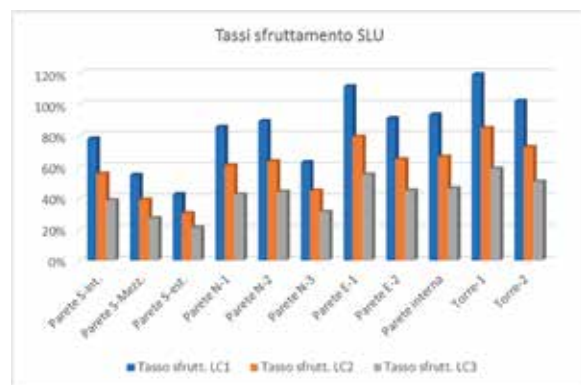


Fig. 16. Tassi di sfruttamento delle murature più sollecitate in base al livello di conoscenza

3.3 Analisi modale

L'analisi modale è stata effettuata considerando un numero di modi superiore a 100 per raggiungere una percentuale di massa partecipante totale attivata pari almeno al 70%. I modi a cui compete la maggiore percentuale di massa partecipante in direzione X (Asse N-S) sono i modi n. 3 e n. 15 (Figura 17), pari rispettivamente al 16.73% e al 14.38%. Nella direzione Y (Asse E-W) i modi che attivano maggiore massa sono i modi n. 1 (Figura 18), n. 12 e n. 14 ai quali corrisponde una percentuale di massa partecipante rispettivamente pari a 12.83%, 7.06% e 12.92%. I risultati dell'analisi modale hanno offerto ulteriori indicazioni e spunti per individuare i possibili cinematismi di collasso da analizzare.

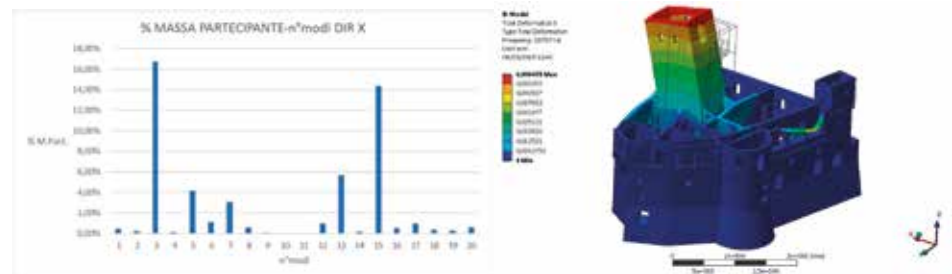


Fig. 17. Massa partecipante dir. X e modo di vibrare n° 15

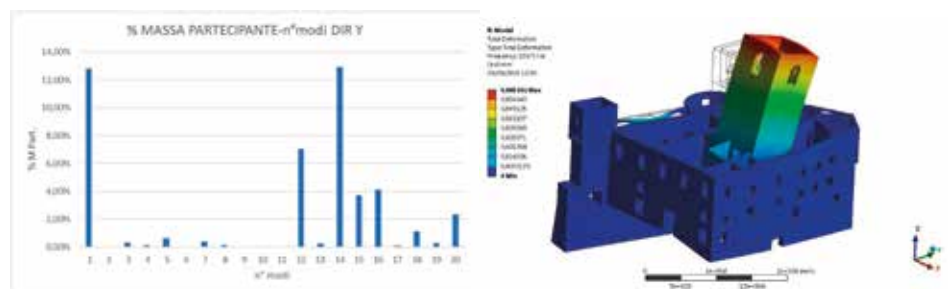


Fig. 18. Massa partecipante dir. Y e modo di vibrare n° 1.

■ La Rocca Ariostesca di Castelnuovo Garfagnana. Analisi strutturale ed intervento di recupero.

3.4 Analisi dei cinematismi di collasso

L'approccio cinematico, adottabile nei casi in cui siano previsti interventi di restauro che interessano singole parti della costruzione, prevede l'impiego di modelli locali riferiti a porzioni strutturalmente autonome della costruzione (macro-elementi). Negli edifici esistenti in muratura spesso, infatti, avvengono collassi parziali, a causa di azioni orizzontali, causati da perdita dell'equilibrio di porzioni murarie a seguito di un evento sismico. La verifica nei riguardi di questi meccanismi assume significato se è garantita una certa monoliticità della parete muraria, tale da impedire collassi puntuali per disgregazione della muratura. Meccanismi locali si attivano nelle pareti murarie prevalentemente per azioni perpendicolari al loro piano, mentre nel caso di azioni nel piano possono svilupparsi meccanismi causati dall'attivazione di sistemi ad arco (Regione Marche 2007; Giuffrè 1995). I meccanismi locali ritenuti significativi per la costruzione della Rocca sono stati stimati sulla base della conoscenza del comportamento sismico di strutture analoghe, già danneggiate dal terremoto, e sono stati inoltre individuati considerando la presenza degli stati fessurativi presenti. Nel caso in oggetto, data la presenza di volte spingenti, e data la geometria della copertura a falde, sono stati ritenuti particolarmente significativi i seguenti meccanismi locali: a) ribaltamento semplice di parete; b) ribaltamento del cantonale.

Una volta individuati i meccanismi potenzialmente

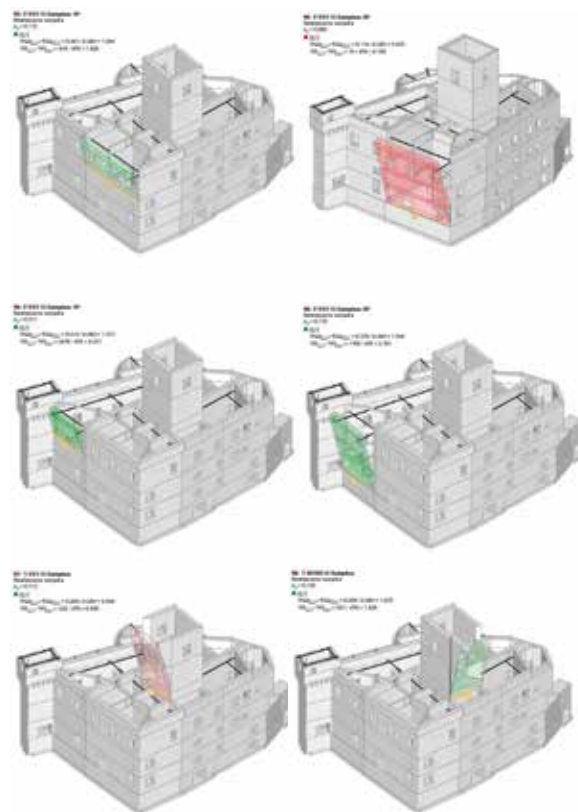


Fig. 19. Cinematismi (dal modello PCM) da Meccanismo n° 3 e meccanismo n° 8.

significativi, l'analisi è stata rivolta alla quantificazione del coefficiente α , moltiplicatore dei carichi orizzontali agenti sugli elementi strutturali, che attiva il cinematismo in questione. Per l'applicazione del metodo di analisi si ipotizza, resistenza nulla a trazione della muratura, assenza di scorrimento tra i blocchi e resistenza a compressione infinita della muratura. L'analisi dei cinematismi è stata effettuata mediante l'utilizzo del software PCM investigando un numero di 19 macroelementi. Le analisi hanno anche tenuto conto del contributo delle catene presenti, recentemente posizionate durante il rifacimento della copertura. L'indice di vulnerabilità sismica ottenuto, valutato come rapporto $\alpha_{g, capacità} / \alpha_{g, domanda}$ è risultato pari a 0.475.

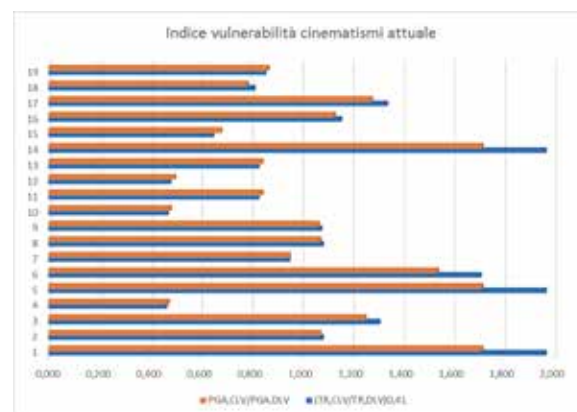


Fig. 20. Indici di vulnerabilità stato attuale.

4. INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO

Gli interventi proposti mirano a colmare le carenze della struttura, così come emerse in fase di verifica, e l'intervento nel complesso si propone come intervento di miglioramento.

Questo paragrafo illustra una serie di interventi mirati a risolvere le criticità strutturali evidenziate nei paragrafi precedenti. Dato che la Rocca è un bene di interesse culturale, gli interventi proposti mirano a raggiungere un compromesso tra esigenze di sicurezza e di conservazione (Quagliarini et al. 2016; Spinelli e al. 2014; Betti et al. 2015) mediante miglioramenti locali dove la scelta della strategia e della tecnica d'intervento, nonché l'urgenza di attuarli, risultano dalle precedenti fasi di valutazione.

Il principio ispiratore degli interventi sui beni monumentali deve fondarsi infatti sulla conservazione non solo della componente materica ma anche del funzionamento strutturale accertato, qualora questo non presenti carenze tali da poter comportare la perdita del bene. Le proposte progettuali sono dunque volte a garantire la conservazione del complesso architettonico in tutte le sue parti evitando, in termini generali, tutte le opere di demolizione-sostituzione, ed operando con interventi che si integrino con la

struttura esistente senza trasformarla radicalmente. La proposta progettuale è stata quindi proporzionata agli obiettivi di sicurezza e durabilità, prevedendo soluzioni tali da produrre il minimo impatto. È stato, in sostanza, preso a riferimento il cosiddetto “criterio del minimo intervento” in base al quale la struttura esistente, quando ancora in grado, deve continuare a lavorare nello stesso modo in cui lavorava prima dell'intervento.

È, dunque, su tali basi concettuali che è stata sviluppata la proposta progettuale di consolidamento strutturale della Rocca. Nello specifico le criticità evidenziate nei paragrafi precedenti sono risolte mediante i seguenti interventi:

- consolidamento dei solai in legno;
- inserimento di tiranti metallici;
- intervento di “cuci-scuci” con interventi localizzati alle sole zone fessurate;
- iniezioni con malte di calce naturale.

Per quanto riguarda i solai, l'intervento di consolidamento primario, messo in opera per alcuni di questi, verrà effettuato tramite realizzazione di una soletta collaborante in calcestruzzo e spillatura perimetrale che permetterà l'incremento di capacità portante e favorirà il collegamento con le murature perimetrali. Per quanto riguarda le murature si andrà ad intervenire con iniezioni di malta di calce, al fine di saturare i vuoti presenti al loro interno ed aumentarne il comportamento monolitico, e con l'inserimento di catene e piastre per evitare il ribaltamento. Le catene saranno in alcuni casi inserite nelle solette dei solai di piano in modo tale da minimizzare l'invasività dell'intervento.

Alcuni degli elementi progettuali sono meglio discussi nel seguito.

Consolidamento solai di piano

La progettazione del consolidamento dei solai in legno avverrà mediante impiego di soletta collaborante in calcestruzzo armato, con chiodatura di travi e travetti. Tale tipologia di intervento è risultata la più idonea al fine di conferire agli orizzontamenti la sufficiente portanza ai carichi verticali previsti per la destinazione d'uso museale. L'intervento è previsto nei locali dove la pavimentazione in cotto è stata sostituita con gli interventi di restauro del dopoguerra; viene comunque previsto, dopo lo smontaggio e la pulizia, il rimontaggio degli elementi della pavimentazione esistente.

Il calcolo di rinforzo dei solai lignei è stato sviluppato secondo il metodo riportato nell'appendice B della UNI EN 1995-1-1:2014. Il metodo si sviluppa partendo da un modello elastico lineare per le travi a sezione composta con connessione a carattere deformabile di cui si ricerca la rigidità efficace (Figura 21). Il metodo consiste nel considerare la deformabilità della connessione tra legno e calcestruzzo; tale

deformabilità consente lo scorrimento relativo per taglio tra i due elementi pur contrastandolo con la rigidità a taglio propria della connessione. Viene abbandonata l'ipotesi di conservazione delle sezioni piane per la sezione composta; tale ipotesi resta valida per la sola sezione di legno e la sola sezione di calcestruzzo; di conseguenza esiste un asse neutro per il legno e uno per il calcestruzzo; il legno lavora a tensoflessione mentre la soletta in calcestruzzo a pressoflessione. I solai oggetto di intervento sono stati individuati considerando la situazione più cautelativa così come determinata dalla verifica statica in condizioni peggiori.

Il consolidamento sarà effettuato con realizzazione di una soletta in calcestruzzo armato collaborante alleggerito di spessore 5 cm e l'utilizzo di barre in acciaio Ø16 ad aderenza migliorata B450C che saranno inserite nelle travi principali mediante resine epossidiche, il passo delle barre calcolato per garantire l'affidabilità del solaio sarà di 10 cm (Figura 22).

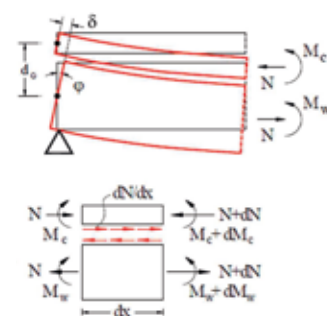


Fig. 21. Comportamento sezione composta.

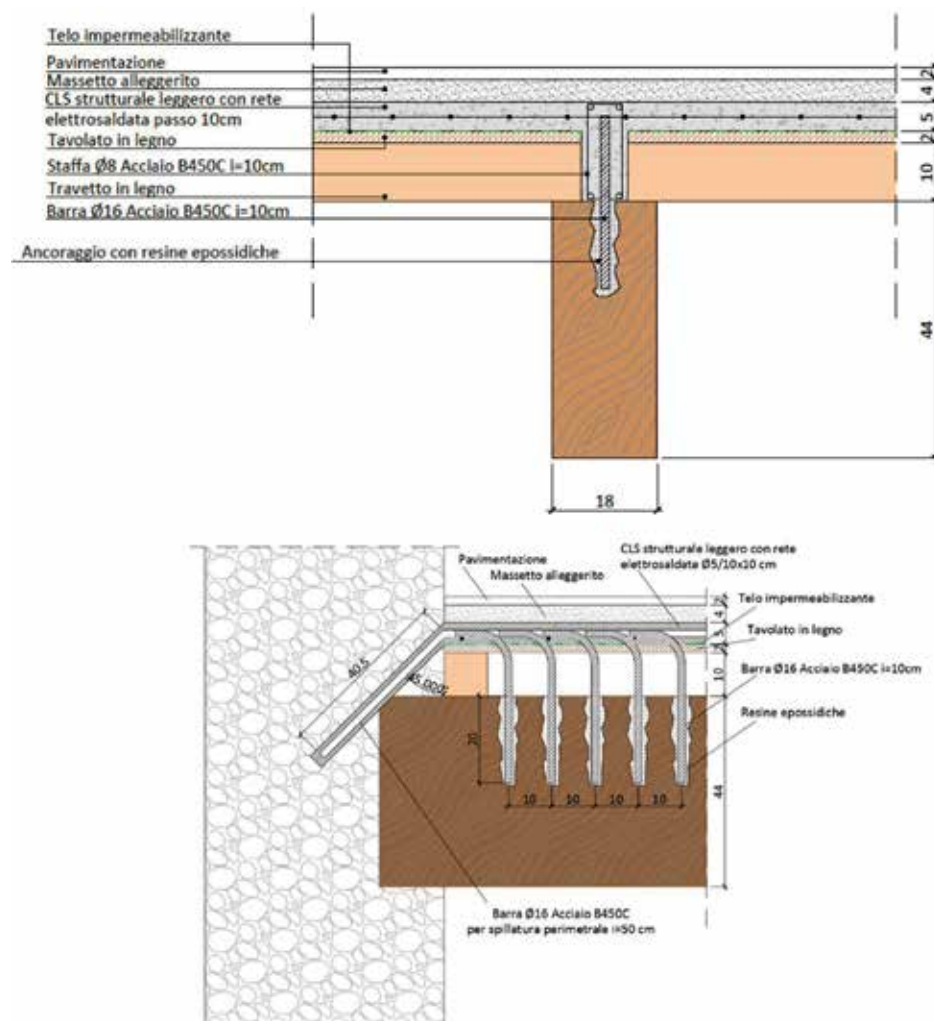


Fig. 22. Sezione tipo rinforzo solaio.

4.1 Inserimento catene

I principi antisismici (progettazione in duttilità o con i criteri del *capacity design*), che sono alla base della moderna legislazione tecnica, male si applicano alle costruzioni storiche in muratura, ma ci possono aiutare in una progettazione più consapevole dei presidi antisismici come per esempio le catene metalliche. In passato il dimensionamento delle costruzioni in muratura era legato a principi basati su semplici regole (regole dell'arte). I proporzionamenti geometrici che si utilizzavano (basati sull'equilibrio) determinavano strutture in cui le dimensioni erano definite in modo da soddisfare un concetto di sicurezza legato più alla solidità strutturale, piuttosto che ad un criterio di resistenza. Tale aspetto porta ad osservare come le catene metalliche presenti negli edifici esistenti in muratura siano spesso caratterizzate da diametri considerevoli (superiori ai 30 mm), non connessi alla resistenza del materiale utilizzato. Il dimensionamento cercava, infatti, di tenere conto al suo interno di regole complessive per la solidità dell'insieme, considerando implicitamente anche la durabilità del presidio al fine di garantire la sicurezza dell'opera nel tempo. Le soluzioni tecniche e i proporzionamenti, ovviamente mutano in relazione al manufatto su cui si interviene, ma i principi che ne governano l'affidabilità strutturale risultano invariati e più o meno implicitamente, noti ai costruttori di un tempo.

Nel caso della Rocca Ariostesca sono state riscontrate criticità per quanto riguarda l'attivazione di alcuni cinematismi; l'intervento proposto per risolvere la problematica del ribaltamento delle murature riguarda la messa in opera di un sistema di catene e

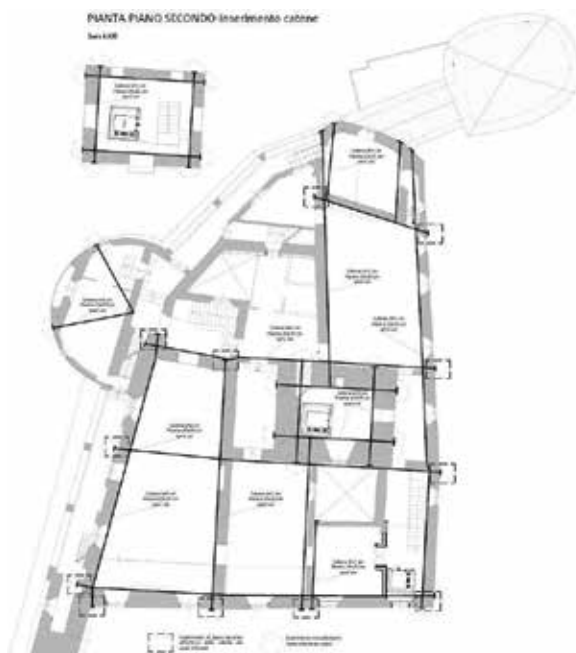


Fig. 23. Inserimento nuove catene piano secondo.

piastre di ancoraggio inserite al livello del secondo piano e nella torre centrale. La verifica è stata effettuata mediante il software PCM inserendo nel modello le catene di diametro $\varnothing 20$ e le piastre 20×20 cm con spessore 2 cm; in tale modello si è tenuto conto anche delle catene esistenti poste al terzo piano della struttura messe in opera con il passato intervento di rifacimento del tetto.

Si riporta in **Figura 23** la pianta con l'individuazione delle nuove catene, mentre in **Figura 24** sono illustrati gli indici di vulnerabilità sismica post-intervento.

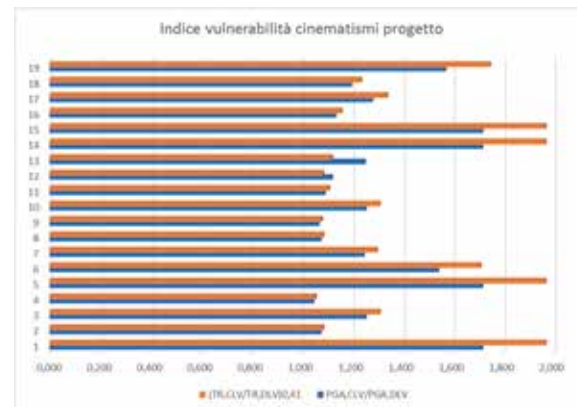


Fig. 24. Indice di vulnerabilità dei cinematismi post intervento.

4.2 Intervento cuci e scuci

Nell'edificio analizzato in seguito ai saggi svolti con asportazione dell'intonaco superficiale sono state riscontrate alcune zone in cui la continuità della parete non è garantita a causa delle lesioni.

L'intervento di consolidamento sostitutivo locale consiste in una demolizione locale di parti di tessitura muraria e successiva ricostruzione. È un'operazione delicata, da eseguire con la massima cautela evitando colpi e vibrazioni durante la fase di demolizione e provvedendo alle eventuali opere di presidio. Si provvederà a demolire la porzione di muratura da sostituire, ad aprire una breccia di estensioni limitate e a procedere alla ricostruzione della porzione smontata con muratura in mattoni o blocchi lapidei. Particolare attenzione va posta nell'ammorsamento delle parti di muratura ricostruita con la muratura esistente; per mettere in carico le porzioni murarie di nuova realizzazione si potranno utilizzare mattoni o pietre a cuneo, opportunamente forzati.

Tale tecnica si presta bene alla riparazione di lesioni che si sviluppano su rami singoli o della stessa famiglia; è particolarmente adatta per la chiusura di vuoti interni alle murature. Di fondamentale importanza è omogeneizzare il comportamento della muratura più che aumentarne la resistenza; d'altra parte l'intervento si configura più come una riparazione, che non un intervento di consolidamento vero e proprio.

4.3 Iniezioni di malta

L'intervento di rinforzo mediante iniezione consiste nell'iniettare malta all'interno di murature cosiddette a sacco, con lo scopo di colmare i vuoti presenti al loro interno. Tali murature spesso risultano riempite con materiali di recupero che nel tempo sia per sedimentazione che per scarsa qualità del riempimento risultano ricche di cavità e non adeguate al compito strutturale a loro richiesto.

L'assenza di consistenza della parte interna della muratura infatti si associa a bassi valori di resistenza e rigidità della muratura. Lo scopo dell'iniezione è quello di ripristinare la continuità interna del materiale fessurato o sconnesso che sia, consentendo di rinforzare la parete muraria e di migliorarne il comportamento nel piano.

Si tratta di un metodo di consolidamento comunemente definito "passivo" che non richiede cioè l'esecuzione di operazioni tali da alterare l'aspetto esteriore della struttura. L'intervento avviene infatti all'interno della struttura stessa. Le miscele consolidanti più adatte allo scopo sono le malte fluide a base di calce idraulica naturale, in grado di incrementare le resistenze delle murature, senza andare a variare in maniera troppo significativa la rigidità del paramento murario.

CONCLUSIONI

Il tema della riqualifica e dello studio degli edifici storici è un lavoro stimolante che presuppone attenzione, cura ed una specifica preparazione. La memoria ha presentato alcuni degli elementi confluiti nel più ampio progetto di recupero di un bene monumentale emblematico: la Rocca Ariostesca di Castelnuovo Garfagnana.

Un'estesa ed esaustiva campagna di indagini sperimentali, finalizzata al raggiungimento di un livello di conoscenza LC2, ha consentito sia di caratterizzare gli elementi più significativi circa tecnologia e dettagli costruttivi, oltre a permettere una stima dei parametri meccanici di resistenza e deformabilità dei materiali. I risultati della campagna di indagine hanno inoltre fornito gli elementi necessari per definire la scala di modellazione da adottare per la selezione degli strumenti numerici operativi da impiegare per effettuare le verifiche di norma. Un modello globale della struttura tramite un codice ad elementi finiti (ANSYS) è stato impiegato per effettuare verifiche in campo statico, mentre l'analisi di vulnerabilità sismica è stata effettuata analizzando un ampio spettro di possibili cinatismi tramite il codice Aedes PCM.

I risultati della analisi numeriche sono stati impiegati per la progettazione degli interventi di recupero e consolidamento, inseriti nel più generale quadro del progetto di riqualifica della Rocca Ariostesca.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori dedicano questo articolo alla memoria del Prof. Ing. Arch. Marco Dezzi Bardeschi scomparso in Firenze il 4 novembre 2018 poco dopo la conclusione del progetto di restauro della Rocca Ariostesca. Gli autori inoltre ringraziano il Comune di Castelnuovo Garfagnana, il Sindaco Andrea Tagliasacchi ed il RUP (Geom. Vincenzo Suffredini) per l'ospitalità e l'interessamento.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Betti M., Orlando M., Spinelli P., Antenore F., Cristiano M.T. (2015). La Rocca Strozzi a Campi Bisenzio: Analisi strutturali e proposte di interventi di consolidamento e miglioramento sismico. Bollettino Ingegneri, Collegio Ingegneri della Toscana, LXIII (5), pp. 3-24.
- Borri A., De Maria A. (2018). Il metodo IQM per la valutazione della qualità muraria. Bollettino Ingegneri, Collegio Ingegneri della Toscana, LXVI (11-12), pp. 4-10.
- Caponi D. La Rocca Ariostesca di Castelnuovo Garfagnana: analisi statica e sismica e interventi di recupero. Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile, Scuola di Ingegneria di Firenze, 2018.
- Circolare 2009. Circolare Ministeriale n.° 617 del 02/02/2009. (2009). "Istruzioni per l'applicazione delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008." G.U. n. 47 del 26.02.2009.
- Del Monte E., Vignoli A. (2008). "In situ mechanical characterization of the mortar in masonry buildings with DRMS". Proceedings of the SACOMATIS conference, Varenna (Co), Italy, 1-2 September 2008, RILEM PRO 59, pp. 421-430.
- Dezzi Bardeschi M., Universo Ariosto a Castelnuovo. Le proposte del gruppo Dezzi Bardeschi per il restauro della Rocca e la creazione di un polo museale su Ludovico Ariosto e la Garfagnana del '800. Maria Pacini Fazzi Editore, Firenze 2017.
- DPCM 2011. Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri, 9 febbraio 2011. "Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008." G. U. n. 47 del 26.02.2011.
- Giuffrè A.. Letture sulla meccanica delle murature storiche. Ed. Kappa, Roma, 1995.
- NTC 2008. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Decreto 14 gennaio 2008. Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008). G.U. n. 29 del 04.02.2008.
- Quagliarini E., Vallucci S., Lenci S. Costruzioni storiche in muratura. Vulnerabilità sismica e progetta-

■ La Rocca Ariostesca di Castelnuovo Garfagnana. Analisi strutturale ed intervento di recupero.

- zione degli interventi. Wolters Kluwer Italia, Milano, 2013.
- Regione Marche. Repertorio dei meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei relativi costi negli edifici in muratura. Ed. ITC CNR L'Aquila, 2007.
 - Spinelli P., Betti M., Conti L., Orlando M., Terenzi G. (a cura di). Atti del Workshop Safe Monuments 2014. Tra conservazione e sicurezza di edifici monumentali e del costruito storico. Ed. Collegio Ing. della Toscana, Firenze, 2014.
 - UNI EN 338:2016. Legno strutturale - Classi di resi-

Giovanni BECATTINI, nato a Pistoia nel 1960, laureato nel 1993 in Ingegneria Civile presso l'Università di Firenze, esercita la libera professione, con studio proprio dal 1994, occupandosi di ingegneria strutturale e geotecnica. Fra gli altri ha curato la progettazione strutturale di vari lavori di restauro e di nuova costruzione, coordinati dal Prof. Ing. Arch. Marco Dezzi Bardeschi.

Michele BETTI, nato a Firenze nel 1971, laureato in Ingegneria Civile nel 1996, è ricercatore presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze. Si interessa di identificazione strutturale occupandosi anche delle tematiche della vulnerabilità sismica di edifici monumentali (in muratura).

stenza. CEN, Bruxelles.

- UNI EN 1926:2007. Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della resistenza a compressione uniassiale. CEN, Bruxelles.
- UNI EN 1995-1-1:2014. Eurocodice 5 - Progettazione delle strutture di legno - Parte 1-1: Regole generali - Regole comuni e regole per gli edifici. CEN, Bruxelles.
- UNI 11119:2004. Beni culturali. Manufatti lignei. Strutture portanti degli edifici - Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera. CEN, Bruxelles.

Duccio CAPONI, nato a Pisa nel 1990, laureato in Ingegneria Edile nel 2018 presso l'Università di Firenze, si occupa di sicurezza e antincendio. I suoi maggiori interessi sono gli edifici in muratura e il recupero dell'esistente.

Maurizio ORLANDO, nato a Locri (RC) nel 1969, laureato nel 1993 in Ingegneria Civile presso l'Università di Firenze, è Professore Associato di Tecnica delle Costruzioni presso la Scuola di Ingegneria dell'Università di Firenze. Tra i suoi interessi di ricerca si segnalano l'analisi statica e sismica di strutture esistenti in c.a. o in muratura e di strutture leggere in acciaio formato a freddo.