

RIPENSARE CASTEL MASEGRA, CONTRIBUTI DI RICERCA PER LA CONSERVAZIONE E LA VALORIZZAZIONE

LA CONOSCENZA DEL COMPORTAMENTO STRUTTURALE

Dario Foppoli

IL PERCORSO DELLA CONOSCENZA

Il problema della sicurezza delle costruzioni esistenti è di fondamentale importanza in Italia, da un lato per l'elevata vulnerabilità soprattutto nei confronti dell'azione sismica di gran parte del patrimonio edilizio esistente, dall'altro per il valore storico-architettonico-artistico dello stesso.

La valutazione della sicurezza e delle prestazioni della struttura sia in campo statico che in campo sismico richiede che la complessità strutturale dell'edificio venga ridotta ad un modello in qualche modo rappresentabile dal punto di vista numerico (Armanasco e Foppoli, 2013).

Per questo risulta essenziale un adeguato livello di conoscenza degli edifici storici in modo da poter scegliere opportunamente i parametri di calcolo, evidenziare le carenze strutturali e orientare nella successiva scelta di eventuali efficaci interventi di conservazione.

Per raggiungere un appropriato livello di conoscenza di un edificio esistente risulta fondamentale:

- ricostruire il processo di realizzazione e le successive modifiche subite nel tempo dal manufatto, nonché gli eventi che lo hanno interessato;
- disporre di informazioni geometrico-strutturali sufficientemente dettagliate, in particolar modo individuando l'organismo resistente della costruzione, i dettagli costruttivi e il quadro generale del suo stato fessurativo e deformativo;
- conseguire un'adeguata conoscenza delle caratteristiche dei materiali e del loro livello di degrado basandosi su documentazione disponibile, verifiche visive in situ e indagini sperimentali.

L'attuale normativa strutturale italiana riguardante i beni culturali (D.P.C.M. 09/02/2011) (D.M. 14/01/2008) mette in particolare evidenza il fatto che non sia comunque possibile (né auspicabile) raggiungere la conoscenza completa di un edificio dal punto di vista strutturale. Per questo traccia un percorso della conoscenza che può essere seguito con differenti livelli di approfondimento che dipendono dall'accuratezza con cui è possibile effettuare le analisi preliminari.

Tale percorso è finalizzato alla definizione di un modello interpretativo della struttura che consenta sia un'interpretazione qualitativa del funzionamento strutturale sia una valutazione quantitativa conseguente all'esecuzione di una vera e propria analisi strutturale. Questo pone l'attenzione in particolare sul fatto che risulta necessario comprendere il comportamento della fabbrica confrontandolo con quanto riscontrato in sito ed essere sempre in grado di fornire una giustificazione intuitiva di quelli che sono i fenomeni attesi, che altrimenti potrebbero essere il mero risultato di calcolazioni aritmetiche non adeguatamente rappresentative del reale comportamento fisico dell'edificio.

Per identificare in maniera completa la costruzione occorre quindi richiamare l'attenzione sulla necessità di raggiungere un accettabile livello di conoscenza sviluppato, nel contesto che riguarda l'ambito degli edifici storici, secondo le seguenti attività:

- rilievo della costruzione, del suo stato fessurativo e deformativo;
- interpretazione dell'evoluzione storica della costruzione;
- individuazione strutturale del manufatto e dei suoi dettagli costruttivi;
- valutazione delle proprietà meccaniche dei materiali e del loro degrado;
- valutazione del complesso suolo-fondazioni.

Come contemplato dalla norma (D.P.C.M. 09/02/2011) in funzione dall'accuratezza con cui sono state eseguite le operazioni di rilievo e di ispezione, le ricerche storiche e le indagini sperimentali devono essere individuati differenti livelli di conoscenza dei parametri coinvolti nel modello, e definiti i relativi fattori di confidenza.

E' opportuno porre l'accento sul fatto che la conoscenza dell'edificio derivante dalle attività di rilievo e di diagnosi non può essere avulsa dall'adeguata comprensione dell'evoluzione storica del manufatto: è evidente che il solo fatto che un edificio si sia finora mantenuto stabile sopportando cedimenti differenziali, venti e terremoti costituisce già la dimostrazione che l'edificio è in qualche misura adeguato per garantire la stabilità nel lungo termine¹. Si può ritenere che la storia abbia costituito un esperimento in scala reale sul manufatto e che le fessurazioni, le distorsioni, gli stati di sforzo ne siano i risultati, che è importante misurare per fare in modo che il modello risulti quanto più possibile aderente al reale ed adeguato per rappresentare il comportamento strutturale del manufatto.

Le analisi sperimentali e numeriche costituiscono quindi un potente strumento per confortare l'osservazione empirica rendendo più oggettiva l'osservazione storica. Tuttavia su edifici esistenti gli attuali strumenti di analisi, anche i più avanzati, risultano spesso inadeguati per spiegare la stabilità di complesse strutture che pure l'hanno dimostrata nel tempo.

Infine si vuole sottolineare come una conoscenza globale dell'edificio sufficientemente dettagliata risulti essenziale sia per ottenere un quadro complessivo dello stato attuale della struttura che per validare da un punto di vista qualitativo i risultati ottenuti dal corrispettivo modello numerico.

LE INDAGINI STRUTTURALI EFFETTUATE

Avendo in precedenza sottolineato il fatto che la caratterizzazione delle strutture e dei materiali costituisce solamente uno degli aspetti che occorre mettere in conto per la valutazione del comportamento strutturale, nel presente capitolo si porrà l'attenzione solamente su tali aspetti in quanto le attività di rilievo e di interpretazione storica ed archeologica sono già state ampiamente trattate da altri.

Le attività svolte a Castel Masegra si collocano nel contesto più ampio di una significativa attività di messa a punto di metodologie di diagnostica e di monitoraggio per la conservazione programmata che è in corso da alcuni anni interessando edifici della media Valtellina caratterizzati da differenti tipologie costruttive, ma da una significativa omogeneità di materiali ed uniformità di epoche costruttive (Foppoli, e Guiducci, 2014). Per questo viene delineato nel seguito l'approccio complessivo alla diagnostica strutturale, conforme a quanto è stato messo a punto anche in altri casi applicativi (Foppoli, Rosina e Realini, 2011) (Armanasco e Foppoli, 2014).

Al fine di pervenire alla comprensione strutturale dell'edificio è necessario in genere valutare attentamente le caratteristiche:

- del suolo, ovvero geometria e materiali delle opere di fondazione e sottofondazione, comportamento del complesso suolo-costruzione;
- delle murature in elevazione, ovvero geometria, stratigrafia, materiali costituenti e loro caratteristiche, stato di conservazione, livello di ammorsamento reciproco delle pareti e presenza di elementi di collegamento in legno o in metallo;
- delle volte in muratura, ovvero anche in questo caso geometria, stratigrafia, materiali costituenti e loro caratteristiche, stato di conservazione, modalità di imposta sulle strutture verticali, efficienza delle eventuali catene metalliche;
- degli orizzontamenti in legno, generalmente solai a cassettoni oppure rivestiti in cannucciato e

¹ Questa considerazione è applicabile nel caso il manufatto non abbia subito trasformazioni significative della sua conformazione strutturale o delle caratteristiche dei suoi materiali

dell'orditura della copertura, ovvero geometria, caratteristiche meccaniche e stato di conservazione. Nel seguito verranno dettagliatamente specificate e descritte le tecniche diagnostiche applicate a Castel Masegra (figura 1) e descritti i risultati ottenuti.

In accordo con l'ufficio tecnico del comune di Sondrio e con la Soprintendenza per le Belle Arti i punti dove effettuare le indagini sono stati individuati prevalentemente nell'ala Sud del castello e nell'edificio con loggetta rinascimentale in quanto questi sono i corpi di fabbrica sui quali si prevede di intervenire nel breve termine. L'ubicazione di dettaglio dei punti di prova è poi stata definita sulla base dei risultati delle indagini stratigrafiche sugli intonaci appositamente effettuate allo scopo di evitare di operare su superfici intonacate particolarmente significative.



Figura 1 - Planimetrie con la localizzazione delle indagini effettuate

Dal punto di vista della modellazione si è operato mettendo a punto, nell'ambito di una tesi discussa al Politecnico di Milano, un modello globale dell'ala Sud dell'edificio (Gusmeroli e Schiantarelli, 2013/2014) a cui nel seguito si farà riferimento per alcune considerazioni di carattere generale, utili ad esemplificare l'uso dei dati diagnostici sia come input del modello sia per la validazione dei suoi

risultati. Contemporaneamente, per pervenire alla valutazione della sicurezza strutturale, è stata effettuata l'analisi limite sia in campo statico sia in campo sismico modellando alcune delle sottostrutture individuate, nella fattispecie le volte al piano terreno dell'edificio con loggetta che si affaccia sul cortile interno del castello. Questo secondo livello di modellazione al momento è stato applicato solo ad alcuni macroelementi strutturali a scopo esemplificativo: l'analisi dovrebbe nel seguito essere applicata in modo esteso a tutti i macroelementi che attivano meccanismi di collasso nell'edificio.

Poiché l'analisi del quadro fessurativo ha consentito di evidenziare alcuni fenomeni fessurativi apparentemente ancora attivi è stato infine installato un semplice sistema di monitoraggio strutturale finalizzato a tenere sotto osservazione l'evoluzione di detto quadro fessurativo.

LE FONDAZIONI

Il comportamento del complesso fondazionale di un edificio storico è fortemente connesso alle modalità di interazione suolo-fondazioni che, nel caso specifico, presenta particolare complessità in quanto il fabbricato costituisce il risultato di più fasi successive di ampliamento e sopraelevazione che hanno modificato nel tempo l'assetto fondazionale, se non



Fig. 2 - Rilievo con video-endoscopia a colori nei fori di carotaggio

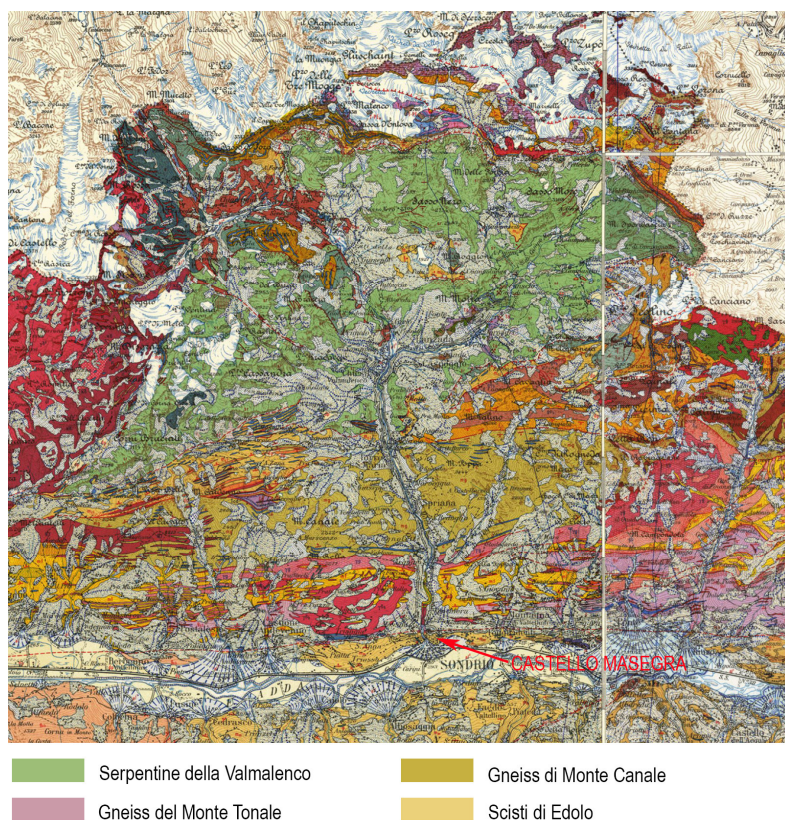


Figura 3 - Mappa geologica della Valmalenco a cui fa riferimento la varietà litologica individuata nelle murature

altro in termini di distribuzione dei carichi sul terreno.

Inoltre Castel Masegra sorge su un rilievo caratterizzato da depositi prevalentemente di origine glaciale, dove il substrato roccioso affiora parzialmente al livello delle fondazioni dell'edificio. Le murature sono state quindi fondate con tecniche variabili in funzione del loro contesto storico e della loro localizzazione nell'ambito dell'edificio.

I sondaggi meccanici a carotaggio continuo realizzati in direzione sub-verticale nelle strutture di fondazione hanno avuto lo scopo di analizzare i materiali costituenti gli elementi strutturali e di determinare la quota e la larghezza del piano di imposta e, per quanto possibile, la geometria della muratura di fondazione. Le carote estratte sono state collocate in apposite cassette catalogatrici con indicazione della sigla e della

profondità del sondaggio e descritte attraverso le stratigrafie di dettaglio. Per migliorare le informazioni acquisite attraverso la descrizione del materiale estratto sono stati inoltre effettuati nei fori di carotaggio rilievi con video-endoscopia a colori (figura 2) che hanno reso possibile anche l'individuazione ed il dimensionamento delle discontinuità e cavità presenti nella struttura muraria.

Le murature risultano apparecchiate con corsi sub-orizzontali e sono costituite da malte di calce (come evidenziato dalla presenza diffusa di calcinaroli) di colorazione e granulometria variabile, da blocchi di varia litologia e pezzatura, prevalentemente gneiss e serpentino. La varietà litologica delle pietre costituenti le murature mostra stretta attinenza con il contesto territoriale della Valmalenco (figura 3),

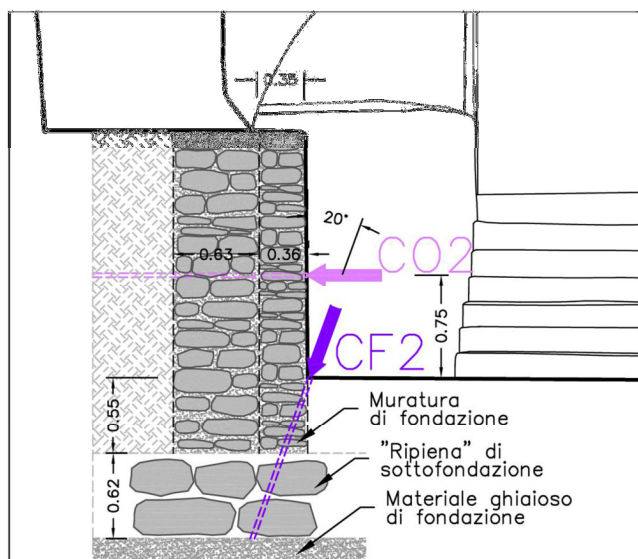


Figura 4 - Stratigrafia della muratura di fondazione individuata mediante video-endoscopia

mentre alcuni blocchi sono presumibilmente da ricondursi ai depositi glaciali presenti sulle prime pendici del versante retico valtellinese. Questo induce a ritenere che le pietre siano state prelevate in parte sul posto, dal dosso su cui sorge il castello, ed in parte dall'alveo del vicino torrente Mallero, che scorre dalla Valmalenco.

Attraverso le ispezioni è stata anche individuata la morfologia del piano di imposta sottostante le murature di fondazione, evidenziando in alcuni casi che esse spiccano direttamente dal substrato roccioso costituito da roccia omogenea (Scisti di Edolo) che appare più fratturata nella parte superficiale e più compatta in profondità (foro CF1-CF3). In altri casi la muratura è impostata su una sottofondazione (localmente detta "ripiena") realizzata con pietre della stessa dimensione e litologia della muratura soprastante, ma non legate con malta. (foro CF2-CF4-CF5 – figura 4).

LE MURATURE IN ELEVAZIONE

Tutte le murature degli edifici storici valtellinesi sono realizzate, come risulta già dalle precedenti osservazioni relative alle fondazioni, con muratura con tessitura sub-orizzontale in pietra e malta, e sono caratterizzate da grossi spessori, in particolare ai piani bassi dei fabbricati. I materiali sono di provenienza strettamente locale, quindi sia gli inerti utilizzati per la malta che le pietre della parete sono nella maggioranza dei casi di natura cristallina, per lo più metamorfica o intrusiva (Di Marco, 1992/1993).

Le indagini effettuate sulle murature del castello sono state finalizzate a valutarne con attenzione la natura e la stratigrafia, con particolare riguardo alla individuazione della presenza di paramenti superficiali poco ammassati e di un eventuale nucleo interno di caratteristiche differenziate rispetto ai paramenti. Sono inoltre state finalizzate a determinare lo stato di sollecitazione e le caratteristiche meccaniche delle murature.

Le tecniche di indagine devono fornire valori dei parametri poi necessari per le verifiche, che possono essere ottenuti solamente da indagini dirette ed intensive (p.e. prove con martinetti piatti) e non da indagini indirette ed estensive (p.e. misure delle velocità soniche): queste ultime forniscono valori indice solo indirettamente correlabili ai parametri meccanici².

² A questo riguardo il DPCM 09/02/2011 al p.to 4.1.7 dichiara esplicitamente che: "Tecniche diagnostiche non distruttive di tipo indiretto, quali prove soniche ed ultrasoniche, consentono di valutare l'omogeneità dei parametri meccanici nelle



Figura 5 - Fasi di esecuzione della prova con un martinetto piatto

Se compatibile con le prevalenti istanze conservative, quindi, l'impatto sull'edificio causato dalle tecniche di prova poco distruttive può essere accettato, ma deve essere ovviamente contenuto, estendendo per quanto possibile i risultati con l'utilizzo di tecniche non distruttive. Nel caso della campagna effettuata si è operato in tal senso correlando i risultati delle prove con martinetti piatti con le misure delle velocità di propagazione degli impulsi sonici.

La conformazione delle murature in elevazione è stata analizzata attraverso sondaggi meccanici a carotaggio continuo realizzati in direzione

orizzontale: essi sono poi stati ispezionati con video-endoscopia in analogia con quanto effettuato per le murature di fondazione.

Il foro CO1 ha evidenziato la presenza di un contromuro di grosso spessore, non ammortato alla parete retrostante, realizzato con grossi blocchi di gabbro; la muratura originale si distingue chiaramente in quanto è realizzata con blocchi di serpentino. Le altre murature sono costituite da blocchi di gneiss, di granito, di serpentino e frammenti di micascisti, anche in questo caso sicuramente provenienti dal contesto circostante (il deposito glaciale su cui è posto il castello) o dalla Valmalenco attraverso il trasporto fluviale del torrente Mallero.

La prova con un martinetto piatto (ASTM C 1196-09, 2009) ha consentito di rilevare lo stato di sollecitazione locale presente nelle strutture murarie, misurando la variazione dello stato tensionale provocata nella muratura da un taglio piano di limitate dimensioni (figura 5).

È stata evidenziata la sostanziale omogeneità del livello di sollecitazione delle murature, compreso fra 0,30 e 0,64 MPa, con l'eccezione di alcune prove che hanno evidenziato, per lo più nell'ala Sud,

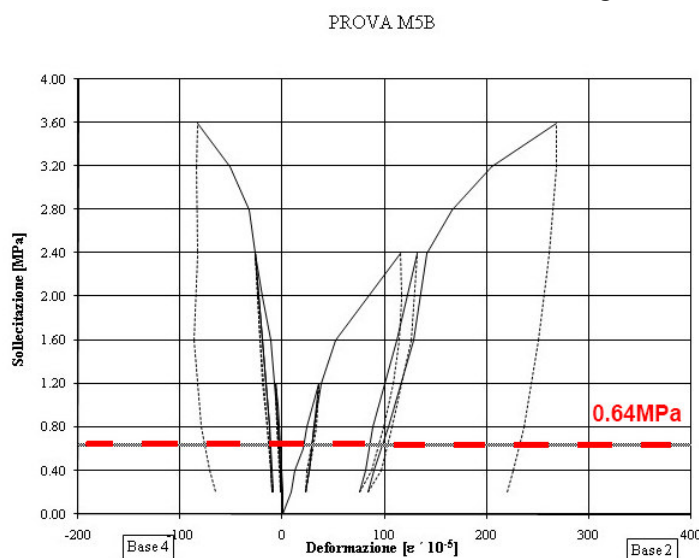


Figura 6 - La curva caratteristica e livello di sollecitazione della muratura ricavate dalla prova con martinetti piatti

diverse parti della costruzione, ma non forniscono stime quantitative attendibili dei loro valori, in quanto essi vengono desunti dalla misura di altre grandezze (ad esempio, la velocità di propagazione di onde di volume). La misura diretta dei parametri meccanici della muratura, in particolare di quelli di resistenza, non può essere eseguita, quindi, se non attraverso prove debolmente distruttive o distruttive, anche se su porzioni limitate. Le calibrazioni di prove non distruttive con prove distruttive possono essere utilizzate per ridurre l'invasività delle indagini di qualificazione".

la presenza di tratti di muratura con bassi livelli di sollecitazione (prove M2 ed M9) o addirittura in trazione (prova M4 realizzata in una delle murature alla base della torre colombaia). Una singola prova (prova M1 realizzata in corrispondenza della torre Nord-Est) ha fornito un livello di sollecitazione molto elevato, corrispondente a 2,04 Mpa. La prova con due martinetti piatti paralleli (ASTM C 1197-09, 2009) ha consentito di determinare in modo non distruttivo le caratteristiche di deformabilità di campioni rappresentativi della muratura (figura 6) e di stimare il valore della resistenza a compressione. I risultati desunti dalle prove effettuate sono riportati nelle Tabella 1 e 2 dove le murature sono state differenziate in due categorie: quelle con caratteristiche meccaniche "scadenti", ubicate per lo più nell'ala Sud e quelle con caratteristiche meccaniche "buone", ubicate per lo più nell'ala Nord del castello (i due corpi di fabbrica Sud e Nord appartengono a differenti fasi costruttive). Si segnala peraltro che anche nei corpi Nord e Sud sono presenti murature con caratteristiche rispettivamente "scadenti" e "buone" in particolare con riferimento ai punti di prova M7 ed M9. Le prove effettuate sulle murature classificate di "buone" caratteristiche hanno potuto essere portate fino a livelli di sollecitazione elevati (generalmente superiori a 4,0 MPa) mentre per le murature classificate di caratteristiche "scadenti" le prove in genere hanno dovuto essere interrotte a livelli di sollecitazione inferiori (tra 1,6 e 3,2 MPa).



Figura 7 - Esecuzione di misure della velocità di propagazione degli impulsi sonici

Le misure della velocità di propagazione degli impulsi sonici (UNI EN 12504-4, 2005) sono state effettuate per trasparenza determinando la velocità delle onde elastiche longitudinali che si propagano fra punti ubicati sui lati opposti di una sezione di indagine (figura 7). Allo scopo di utilizzare tali misure indirette per estendere i risultati delle prove dirette, le misure di velocità sonica sono state ripetute anche in alcuni punti dove erano già state realizzate precedenti prove con martinetti piatti (Tabella 3), associando i valori di velocità dedotti dalle prime ed i valori del modulo elastico forniti dalle seconde. Anche in questo caso l'analisi dei risultati consente di discriminare chiaramente le due tipologie murarie già descritte:

- le prove SD1, SD3, SD4, T1 e T2, che hanno fornito valori medi di velocità 2447 m/s, possono essere attribuite ad una muratura di buone caratteristiche, simili a quelle fornite dalla prova M5B;
- la prova SD2, che ha fornito valore della velocità sonica pari a 1427 m/s, può essere attribuite ad una muratura di caratteristiche scadenti, simili a quelle fornite dalla prova M7B.

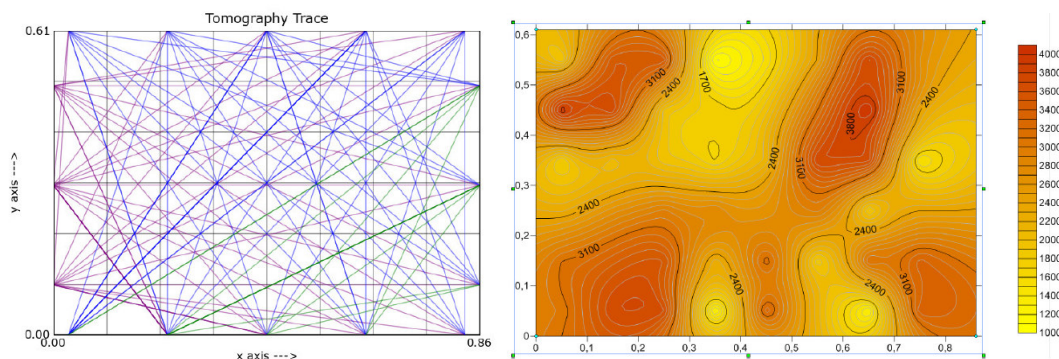


Figura 8 - Mappa della distribuzione della velocità di propagazione delle onde soniche

Alcune prove realizzate in corrispondenza dei pilastri del portico dell'ala Sud del castello sono poi state elaborate con metodi tomografici allo scopo di valutare l'omogeneità della sezione muraria (figura 8). In questo caso le misure soniche sono state ripetute secondo una fitta griglia di punti di emissione/ricezione, seguendo un elevato numero di percorsi ed elaborate ricavando tomogrammi a colori che mostrano mappe della distribuzione della velocità di propagazione delle onde longitudinali. Le prove effettuate consentono di escludere la presenza nelle murature di un nucleo interno di caratteristiche scadenti rispetto alla muratura dei paramenti, confermando così l'ipotesi che i pilastri siano realizzati in sezione a tessitura omogenea.

PROVA			MODULI DI DEFORMABILITÀ [MPa]					
N.	UBICAZ.	σ_v [MPa]	[0.4 - 0.8]	[0.8 - 1.2]	[1.2 - 1.6]	[1.6-2.0]	[2.0-2.4]	σ_{max} [MPa]
M2	Ala Sud	0.09	233	164	196			1,6
M3	Ala Sud	0.47	1333	2174		939		3,2
M4	Ala Sud	Traz	833	714	535	299		2,0
M7	Ala Nord	0.30	1316	806	1087	476	286	2.4

Tabella 1 Prove con martinetti piatti: stato di sollecitazione, modulo di deformabilità secante (calcolato in corrispondenza del primo ciclo di carico) e sollecitazione massima raggiunta.

Murature di caratteristiche meccaniche scadenti

PROVA			MODULI DI DEFORMABILITÀ [MPa]					
N.	UBICAZ.	σ_v [MPa]	[0.4 - 0.8]	[0.8 - 1.2]	[1.2 - 1.6]	[1.6-2.0]	[2.0-2.4]	σ_{max} [MPa]
M1	Ala Nord	2.04	6667	7692	8333	6250	1923	>4,0
M5	Ala Nord	0.64	3448	3846	1266	1274	625*	3,6
M6	Ala Nord	0.47	4545	6667	4762	5714	4444	>4,0
M8	Ala Nord	0.34	12500	11765	6897	6061	3846	>4,0
M9	Ala Sud	0.09	5556	6667	5556	1250	1136	>2,4

Tabella 2 Prove con martinetti piatti: stato di sollecitazione, modulo di deformabilità secante (calcolato in corrispondenza del primo ciclo di carico) e sollecitazione massima raggiunta.

Murature di buone caratteristiche meccaniche

Prova sonica	SD1	SD2	SD3	SD4	T1	T2
Velocità [m/s]	2587	1427	2477	2158	2707	2310
Prova con MP	M5B	M7B				

Tabella 3 Misure della velocità di propagazione degli impulsi sonici effettuate per trasparenza

LE VOLTE IN MURATURA

Secondo la teoria dell'analisi limite la resistenza ultima dei sistemi voltati è strettamente correlata alla loro geometria ed alla distribuzione dei carichi piuttosto che alle caratteristiche meccaniche dei materiali. Infatti nella pressoché generalità dei casi si dimostra che il fattore determinante del collasso di una volta non è il raggiungimento del limite di resistenza della muratura, quanto piuttosto la

formazione di cerniere alternate e dissimmetriche che degradano la volta (che nella sua conformazione originale può essere schematizzata come è una struttura isostatica) in una struttura ipostatica, dando così luogo alla formazione di un cinematismo (Heyman, 1966) (Heyman 1969). Ciò è vero in particolare nell'ipotesi che i piedritti risultino fissi, ovvero che la volta sia adeguatamente contraffortata oppure che le catene siano correttamente dimensionate per riprendere la spinta orizzontale.

La comprensione del suddetto comportamento strutturale è fondamentale per orientare correttamente l'esecuzione delle indagini sulle volte, in quanto da esso consegue che i parametri fondamentali da analizzare sono le caratteristiche geometriche della struttura e semmai le caratteristiche dei tiranti che, dal punto di vista meccanico, risultano in genere l'elemento critico.

E' semplice rilevare la geometria dell'intradosso delle volte, non altrettanto determinare il loro spessore strutturale per la presenza di numerosi strati sovrammessi (rinfianchi, sottofondi e pavimentazioni) di spessore variabile, maggiore ai fianchi della volta e minore in chiave.

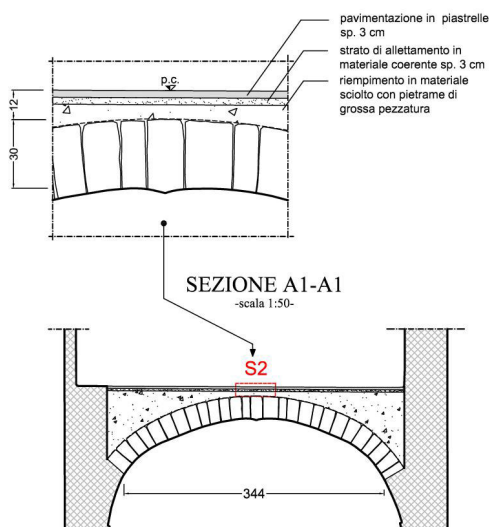


Figura 9 - Rilievo di una volta e sua stratigrafia

saggi esplorativi dall'estradosso. La geometria delle volte analizzate è graficamente descritta in figura 9, dove sono stati evidenziati sia i materiali che gli spessori rilevati dai quali è possibile determinare la geometria di calcolo.

Lo stato tensionale delle catene metalliche è stato poi misurato eseguendo sulle stesse rilievi dinamici (figura 10): con l'utilizzo di un martello è stata applicata alla catena un'eccitazione impulsiva e mediante un accelerometro sono state registrate le vibrazioni conseguenti, poi analizzate determinando il valore delle prime frequenze proprie della catena in direzione orizzontale e verticale. Il calcolo del tiro è stato effettuato a partire da questi valori, elaborati a partire dalle caratteristiche geometriche della catena.

Il confronto fra i valori delle frequenze proprie misurate e i valori calcolati delle frequenze proprie per catena scarica ha messo in evidenza che tutte le catene sono in tiro. Inoltre:

Nell'ambito delle già citate sperimentazioni per la messa a punto dei sistemi diagnostici (Foppoli, Rosina e Realini, 2011) (Armanasco e Foppoli, 2014) si è già operato a questo scopo effettuando rilievi dall'intradosso con l'utilizzo di tecniche geo-radar. Questa metodologia non è tuttavia risultata del tutto soddisfacente sia al Masegra che in altri edifici valtelinesi, in quanto nella maggior parte dei casi i rinfianchi sono realizzati con gli stessi materiali della muratura, solamente con scarsa presenza di malta, e quindi non presentano costanti dielettriche sufficientemente differenti dalla muratura dell'arco da consentire di discriminarli con queste tecniche.

Nel caso di Castel Masegra, per rappresentare adeguatamente il profilo dei sistemi voltati in esame, l'intradosso è stato definito a partire dal rilievo laser scanner delle sezioni mentre lo spessore è stato desunto dall'ispezione effettuata realizzando piccoli



Figura 10 - Rilievi dinamici per la misura dello stato di sollecitazione delle catene

- la maggior parte delle catene presentano soluzioni con una situazione vincolare simmetrica di doppio incastro, le due catene del piano interrato dell'ala Sud (MC1-MC2) presentano valori di sollecitazione molto bassi, mentre le catene del loggiato (MC3-MC4-MC5) presentano valori del tiro simili fra loro con sollecitazioni più elevate ma comunque contenute (valori tensionali inferiori a 72 MPa);
- la catena MC6 nel sottotetto dell'ala sud presenta la soluzione con situazione vincolare diversa in direzione verticale (doppio incastro) e orizzontale (incastro/appoggio), il valore della sollecitazione rilevata è anche in questo caso molto basso.

GLI ORIZZONTAMENTI IN LEGNO

L'ispezione delle strutture in legno è stata eseguita nel rispetto dei criteri e delle procedure stabilite nella norma (UNI 11119, 2004) al fine di pervenire alla classificazione del legname in opera secondo la qualità resistente.



Figura 11 - Esecuzione prova con Resistograph

L'analisi visiva ha consentito di definire lo stato di conservazione di tali strutture e di individuare e circoscrivere le zone evidentemente degradate e le zone di possibile degrado che necessitano di essere sottoposte a successivo approfondimento mediante analisi strumentale.

Laddove sono stati riscontrati segnali di anomalia (cretti, fessurazioni, miceli fungini, screpolature, rosime di insetti, torsioni...) l'indagine visiva è stata integrata mediante l'utilizzo di attrezzature manuali (punteruolo e martello). Nel caso sussistessero ulteriori dubbi (eccessivo intenerimento superficiale, suoni sordi alla percussione, distacco di strutture lignee) e nei punti non direttamente ispezionabili (all'appoggio sulle murature) l'approfondimento diagnostico è

stato eseguito mediante analisi strumentali effettuate tramite l'uso di specifico penetrometro (figura 11) che misura la resistenza alla perforazione del legno, che a sua volta risulta fortemente correlata alla densità dello stesso (Rinn, 1994).

Le variazioni di densità rilevate (Rinn 1993) consentono di individuare la presenza di crepe e lesioni (Figura 12) e le zone dove il legno risulta decomposto o in via di decomposizione, a causa di carie.

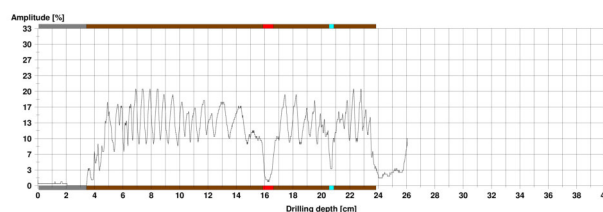
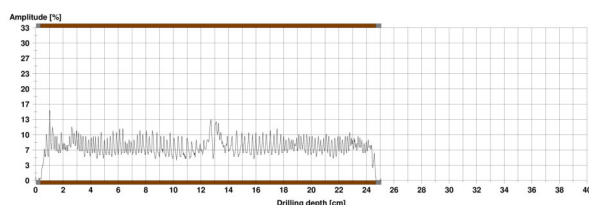


Figura 12 - Dendrogrammi ricavati dalla prove con Resistograph

Negli anni '90, fu effettuato dalla Soprintendenza per i beni Architettonici e Paesaggistici della Lombardia, un intervento generalizzato di rifacimento delle coperture del castello. Nel corso dell'ispezione visiva condotta sugli elementi della copertura sono state individuate le diverse tecniche di intervento attuate, ottenendo un quadro dettagliato delle zone della copertura interessate dalle stesse.

In generale gli interventi effettuati sono stati finalizzati alla sostituzione dell'assito ed alla sostituzione/consolidamento dell'orditura primaria e secondaria.

Escludendo le zone ove è stata effettuata la completa sostituzione dell'orditura primaria e secondaria, per ogni elemento ligneo è stato successivamente condotto il rilievo della sezione e della geometria, integrato con informazioni desunte dall'analisi visiva, che ha consentito di acquisire un quadro dettagliato delle caratteristiche del legname (inclinazione della fibra, dimensioni dei nodi, geometria), degli stati di deformazione/decadimento e di classificare gli elementi strutturali in conformità con quanto definito dalla norma. Nei punti identificati come significativi sulla base degli esiti di tale ispezione sono state realizzate indagini strumentali penetrometriche con Resistograph al fine di valutare l'estensione dell'eventuale degrado.

Osservando i risultati emersi dall'analisi (figura 13), si rileva che globalmente la copertura è in buono stato di conservazione, ad eccezione di alcune zone limitate dei corpi Nord e Sud, ove si riscontrano deformazioni rilevanti delle travi di colmo. Anche gli elementi secondari presentano globalmente un buono stato di conservazione, escludendo alcune zone soggette ad un degrado superficiale inferiore al centimetro ed a perdite della sezione resistente inferiore al 30%. Si è evidenziato infine che in alcune zone dell'ala Sud-Est e Nord il tavolato risulta degradato a causa di infiltrazioni localizzate di acqua piovana.



Figura 13 - Estratto dei risultati relativi alla copertura dell'edificio con loggetta rinascimentale

LA MODELLAZIONE STRUTTURALE

LA VALIDAZIONE DEL MODELLO STRUTTURALE CON L'UTILIZZO DEI DATI DIAGNOSTICI

Come già in precedenza specificato, il Politecnico di Milano ha curato la predisposizione di un modello strutturale agli elementi finiti del corpo Sud del castello (Gusmeroli e Schiantarelli, 2013/2014). Nel presente capitolo si fa riferimento ad esso per esemplificare le modalità di interazione tra i dati diagnostici e la modellazione strutturale.

La geometria del modello è stata sviluppata direttamente a partire dal rilievo laser scanner, opportunamente integrato attraverso i rilievi di dettaglio necessari per l'identificazione strutturale del complesso.

Il modello è stato implementato con le informazioni tratte dalle attività diagnostiche, in particolare quelle relative a:

- geometria delle fondazioni;
- stratigrafia delle murature;
- spessori strutturali e stratigrafia delle volte;
- caratteristiche meccaniche delle travature in legno;
- caratteristiche meccaniche delle murature (sulla base dei risultati delle prove con martinetto piatto sono state assunte per le murature le caratteristiche riportate in Tabella 4)

Il modello così realizzato, soggetto a carichi statici, è poi stato analizzato dapprima in campo elastico lineare; è stato così possibile confrontare i risultati della modellazione da quelli desunti dalle prove in

sito. Un primo confronto ha riguardato i valori tensionali: i dati sperimentali rilevati con martinetto piatto sono confrontati con quelli ottenuti con il modello e.f. con varie ipotesi relative alle caratteristiche dei materiali e dei suoli, ottenendo i risultati esemplificati nella tabella 5.

Questi valori mettono in evidenza come in qualche caso il modello riesce a cogliere in modo significativo il comportamento strutturale (M3 ed M9). Per contro nel caso della prova M4 i risultati non evidenziano lo stato di trazione che pure è stato rilevato, presumibilmente in quanto la torre interessata dalla stessa prova ha subito una significativa rotazione in direzione Est che condiziona fortemente la distribuzione dei carichi e che le condizioni al contorno imposte al modello non sono in grado di cogliere correttamente.

Allo stesso modo è stato possibile estrapolare dal modello i dati della trazione delle catene e confrontarli con i valori di trazione ottenuti dalle misure di vibrazione, come riportato in tabella 6.

Materiale	Peso Specifico [kN/m³]	Modulo Elastico [MPa]	Coefficiente di Poisson
Muratura	22	540-7220	0,2

Tabella 4 Proprietà fisiche e meccaniche della muratura assunte sulla base dei dati diagnostici nel modello ad e.f.

PROVA N.	UBICAZIONE	σ_v [MPa] martinetto	σ_v [MPa] modello³
M2	Muro Nord locale interrato	0,09	0,245
M3	Muro Sud locale interrato	0,47	0,342
M4	Muro ovest torre colombaia	Traz.	0,239
M9	Muro Nord primo piano	0,09	0,098

Tabella 5 Confronto tra i valori desunti dal modello matematico ed i risultati delle prove con martinetti piatti

PROVA N.	H [kN] mod. tridimensionale	H [kN] misure in situ
Interrato est (AC1)	31,32	27,80
Interrato ovest (AC2)	35,46	13,80
Arco primo piano (AC6)	3,71	18,00

Tabella 6 Confronto tra i valori desunti dal modello matematico ed i risultati delle prove sulle catene

Anche in questo caso il modello non consente di cogliere appieno il comportamento complessivo; peraltro la significativa dissimmetria misurata per le catene nel primo piano non trova una plausibile giustificazione teorica, se non presupponendo una storia di carico differente per le due catene (ovvero cedimenti fondazionali oppure modifiche strutturali che hanno inciso in modo dissimmetrico su di esse). Nel complesso, come peraltro è già stato riscontrato in casi analoghi (Armanasco e Foppoli, 2014), la corrispondenza tra i dati della modellazione ed i dati diagnostici non appare sempre ottimale. Occorre ancora una volta sottolineare che tale differenza è giustificata non tanto dall'imprecisione dei risultati diagnostici, la quale è nota (la norma ASTM C 1196-09, 2009 precisa che il coefficiente di

³ valori calcolati con l'ipotesi di vincolo di incastro in fondazione e di modulo elastico delle murature differenziato in dipendenza dei risultati delle prove con martinetti piatti

variazione del metodo di prova con martinetti piatti è contenuta entro il 20%), quanto dalla disomogeneità intrinseca della muratura che non può essere rappresentata in modo compiuto dal modello agli elementi finiti il quale, per essere implementato, impone di operare una notevole semplificazione delle realtà.

ANALISI DEI MECCANISMI DI COLLASSO (VOLTE)

A livello locale è possibile individuare in un edificio una serie di meccanismi di collasso che vengono attivati, p.e. in caso di sisma, e che condizionano la sicurezza strutturale.

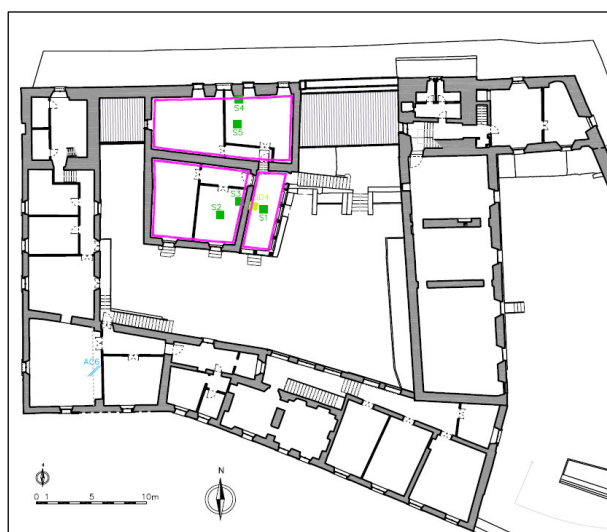


Figura 14 - Localizzazione delle volte analizzate

superiormente è presente uno strato di allettamento di spessore variabile in materiale coerente sul quale appoggia la pavimentazione.

Le verifiche strutturali sono state dunque realizzate sia in campo statico sia in campo sismico effettuando un'analisi limite basata sulla teoria delineata da Heyman (Heyman, 1966) (Heyman, 1969), utilizzando un modello a "blocchi rigidi" basato sull'ipotesi di muratura non reagente a trazione, resistenza infinita a compressione ed assenza di slittamento tra un concio e l'altro. Con le ipotesi suddette, come già detto, il collasso strutturale può avvenire solo per trasformazione della struttura stessa in un cinematismo (figura 16). I sistemi voltati sono stati analizzati con il metodo degli stati limite utilizzando le combinazioni previste dalla norma D.M. 14/01/2008): poiché una delle ipotesi di utilizzo dell'edificio prevede di destinare a biblioteca i locali oggetto della presente analisi, è stato considerato un carico di esercizio pari a 6 kN/m^2 . Per quanto concerne la stabilità nei confronti dei carichi statici, la volta a crociera e la volta con lunette evidenziano valori dei fattori di sicurezza di poco inferiori all'unità, mentre la volta a botte assume un fattore di sicurezza pari a 2.80. Tali

A Castel Masegra tale analisi è stata svolta, a titolo esemplificativo, per le volte del già citato edificio con loggetta (figura 14 - figura 15). Per ognuna delle volte al piano terra l'analisi strutturale ha consentito di valutare il livello di sicurezza nei confronti delle azioni statiche e sismiche, assunte in funzione della classe d'uso dell'edificio.

I profili geometrici dei sistemi voltati sono stati definiti direttamente a partire dalla nuvola di punti fornita dal rilievo laser-scanner. Sulla base delle informazioni geometriche relative allo spessore dei rinfianchi e degli strati di pavimentazione sono stati determinati i profili strutturali di calcolo e la rispettiva stratigrafia di ogni volta. Le volte in analisi risultano realizzate con pietrame posto di coltello allettato con malta, ed hanno spessori compresi tra i 25-35 cm; i rinfianchi sono realizzati con materiale sciolto costituito da pietrame di grossa pezzatura, e

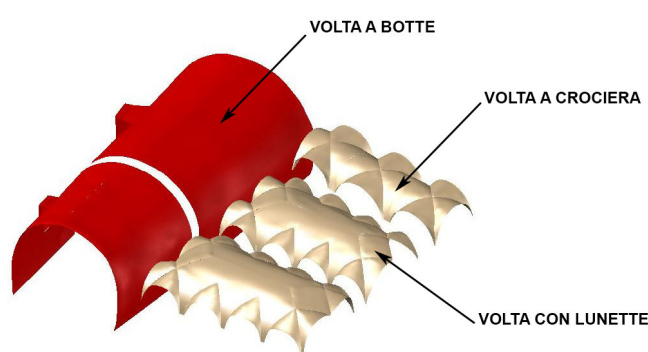


Figura 15 - Schema assonometrico delle volte analizzate con in evidenza la volta a botte

differenze sono essenzialmente attribuibili alla variabilità nelle luci e nello spessore tra una volta e l'altra.

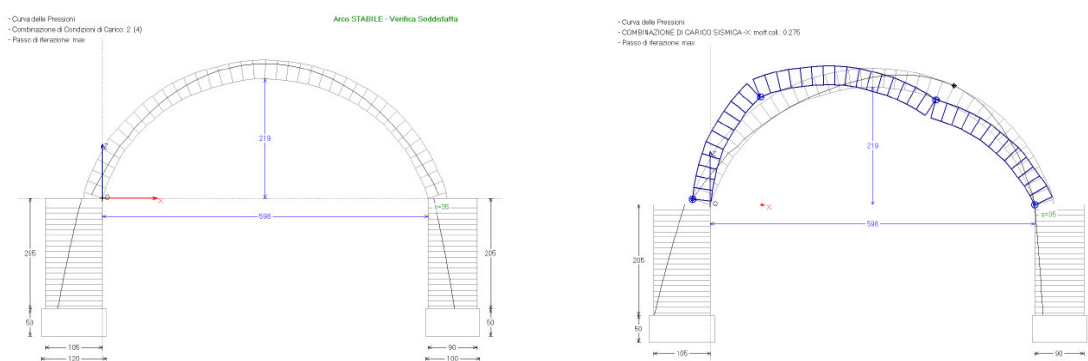


Figura 16 - Sulla sinistra è riportata la curva delle pressioni della volta a botte soggetta a carichi statici e sulla destra per la medesima volta il cinematismo di collasso e la relativa curva delle pressioni

Per quanto concerne la valutazione della sicurezza sismica, calcolata per un tempo di ritorno TR pari a 712 anni, si riscontra un indicatore di rischio sismico maggiore di 1,167 per la volta a botte e la volta con lunette, ed inferiore all'unità per la volta a crociera. L'unica volta che risulta adeguata sia nei confronti dei carichi statici sia nei confronti dei carichi sismici risulta quindi la volta a botte.

Alla luce di queste considerazioni e del fatto che l'edificio non assume un ruolo strategico ai sensi della normativa, in riferimento alle volte a crociera e con lunette, una possibile scelta operativa è quella di porre limitazioni all'entità dei carichi variabili oppure definire una destinazione d'uso conforme alle capacità prestazionali delle singole volte. In alternativa è possibile prevedere di effettuare interventi di miglioramento⁴, nel rispetto della concezione strutturale originale dell'edificio, al fine incrementare il fattore di sicurezza sia nei confronti dei carichi statici che sismici.

IL MONITORAGGIO STRUTTURALE

Nel corso dei rilievi e delle indagini effettuate è stata riscontrata la presenza di un articolato quadro fessurativo sulle murature. Sono state inoltre evidenziate alcune criticità locali soprattutto in prossimità della torre Nord, dove i lavori in corso potevano comportare variazioni degli assetti strutturali, ed in prossimità della torre colombaia del corpo Sud, dove è stata osservata la formazione di nuove fessure sugli intonaci recentemente restaurati. In accordo con l'ufficio tecnico del Comune di Sondrio è stata



Figura 17 - Il monitoraggio strutturale

⁴ A questo riguardo il DPCM 09/02/2011 al p.to 2.2 stabilisce che: "L'adozione del miglioramento in deroga all'adeguamento, in linea di principio consiste semplicemente nell'accettare per l'edificio una vita nominale più breve, ma è evidente che se questa scende sotto certi limiti la probabilità annuale di occorrenza di un terremoto che porta allo SLV potrebbe risultare troppo elevata, oltre al problema di dover procedere in tempi ravvicinati ad una nuova verifica: considerate le conseguenze di un eventuale collasso, si ritiene pertanto che, al di sopra di un certo livello di rischio (vita nominale troppo breve), debba essere presa seriamente in considerazione la possibilità di delocalizzare le funzioni rilevanti e/o strategiche"

quindi assunta la decisione di procedere al monitoraggio strutturale controllando l'entità dei movimenti delle principali lesioni localizzati nelle suddette zone critiche (individuare in figura 1) attraverso misure effettuate con estensimetro meccanico rimovibile: ad una distanza relativa di 200 mm, a cavallo della lesione ed in direzione ortogonale alla stessa, sono state installate due piastrine di acciaio invar da utilizzare come base di misura, la cui distanza viene letta manualmente con uno strumento dotato di comparatore millesimale con risoluzione pari a 0.002 mm (figura 17).

Tale modalità operativa consente l'acquisizione discontinua dei dati con periodicità predefinita (in questo caso mensile) e risulta economica e speditiva. Le letture effettuate forniscono i dati necessari per analizzare l'evoluzione dei fenomeni fessurativi e deformativi evidenziando la stretta correlazione tra i movimenti strutturali e le variazioni di temperatura.

Per valutare i dati acquisiti è necessario innanzitutto ipotizzare quale sia l'effetto dei movimenti di origine termica attesi dal controllo delle strutture in oggetto. Un aumento della temperatura è correlato usualmente con la dilatazione dei due corpi murari separati dalla fessura stessa e quindi, se non sono presenti gradi di iperstaticità che complicano l'interpretazione strutturale del fenomeno, è correlato alla chiusura delle fessure (variazione negativa).

Gli spostamenti effettivamente rilevati monitorando le fessure della struttura in oggetto variano in opposizione di fase rispetto alla temperatura: ciò conferma l'andamento sopra ipotizzato (figura 18).

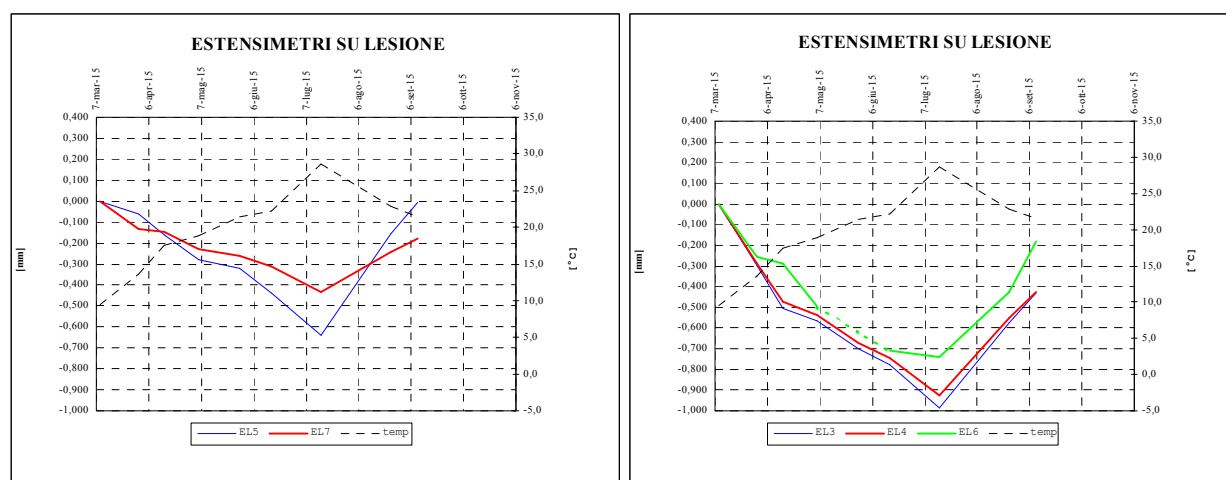


Figura 18 - Diagramma delle variazioni di apertura delle lesioni (linee colorate) e delle variazioni di temperatura (linee tratteggiate)

E' evidente quindi che un periodo di monitoraggio ridotto come quello finora trascorso (6 mesi) non consente di esprimere giudizi relativi alla stabilità nel tempo delle fessure; solamente l'osservazione protratta per una finestra significativa di almeno un anno, congrua rispetto alla periodicità della variazione di temperatura, può consentire valutazioni corrette.

CONCLUSIONI

Le indagini realizzate a Castel Masegra hanno consentito di pervenire alla caratterizzazione dei materiali e delle strutture, di effettuare alcune valutazioni preliminari sulla sicurezza del complesso e di ottenere i dati necessari per l'implementazione e la validazione dei modelli di calcolo del comportamento strutturale dell'edificio che potranno essere utilizzati per meglio circostanziare tali valutazioni.

Per quanto riguarda le fondazioni è stato osservato che, in relazione alle modalità di affioramento locale del substrato roccioso nell'ambito del rilievo su cui sorge il castello, le murature risultano in

parte impostate direttamente sulla roccia ed in parte, tramite una ripiena di sottofondazione, sui depositi di origine glaciale che caratterizzano il dosso. In elevazione le prove con martinetto piatto, associate alle misure della velocità delle onde soniche, hanno consentito di discriminare l'evidente presenza di due tipologie murarie distinte: le murature del corpo Sud, con caratteristiche meccaniche più scadenti e valori di velocità ridotti, e quelle del corpo Nord, con parametri evidentemente migliori. La stratigrafia delle murature, analizzata anche attraverso tomografie soniche, non segnala tuttavia differenze di tessitura tra il nucleo interno ed i paramenti della muratura.

L'ispezione effettuata in copertura ha bene evidenziato gli interventi di rifacimento dell'orditura (parziale ed in qualche caso totale) effettuati negli anni '90 ed ha consentito di rilevare, anche per via strumentale, lo stato di conservazione del legname, che risulta generalmente buono, consentendo di localizzare puntualmente gli elementi degradati. Il rilievo della geometria e della stratigrafia di alcune delle volte, caratterizzate da struttura in muratura di pietra e malta e dalla presenza di materiale di rinfiacco incoerente, ha infine consentito di analizzarne i meccanismi di collasso per valutare la sicurezza di tali elementi strutturali sia in campo statico che in campo sismico, determinando i valori massimi di carico di esercizio ammissibili per le stesse.

Al termine della campagna di indagine è stato installato nel castello un semplice sistema di monitoraggio strutturale allo scopo di tenere sotto controllo le variazioni di apertura di alcune delle più significative fessure rilevate, in particolare di quelle che hanno mostrato evidenti segnali di attività.

BIBLIOGRAFIA

Armanasco A., Foppoli D. Dalla conoscenza dell'edificio alla modellazione strutturale, un percorso obbligato: il caso di due edifici seicenteschi nel contesto valtellinese. Atti del convegno Filosofia della Conservazione e Prassi del restauro, Napoli 2013 pp. 440-444

Armanasco A., Foppoli D., Diagnostic tests vs structural models: the utility of the comparison, Proceedings of 11th International conference on non-destructive investigations and microanalysis for the diagnostics and conservation of cultural and environmental heritage (Art'14), Madrid 2014

ASTM C 1196-09 Standard test method for in situ measurement of masonry deformability properties using the flat jack method

ASTM C 1197-09 Standard test method for in situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flat jack measurements

D.P.C.M. 09/02/2011, Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008

D.M. 14/01/2008, Norme tecniche per le costruzioni

Di Marco M., Studi petrografici applicati al restauro di opere monumentali: alcuni esempi nell'area valtellinese, tesi di laurea presso l'Università degli Studi di Milano, AA 1992/1993

Foppoli D., Guiducci S., "Esperienze di Conservazione Programmata in Valtellina", Kermes quaderni, ed. Nardini, Firenze 2014, pp. 247-254.

Foppoli D., Rosina E., Realini M., "Un approccio diagnostico non distruttivo funzionale alla conservazione programmata – il caso del palazzo Besta di Teglio (SO)", Atti Conferenza nazionale sulle prove non distruttive monitoraggio diagnostica, Firenze 2011. pp1-10.

Gusmeroli G., Schiantarelli G., From laser cloud to BIM and Finite Element Analysis: the case study of Castel Masegra, tesi di laurea presso il Politecnico di Milano, AA 2013/2014

Heyman J, “The stone skeleton”, Int. J. Solids Structures, Vol.2 Pergamon Press Ltd. G.B., 1966, pp. 249- 279.

Heyman J, “The safety of masonry arches”, Int. J. Mech. Sci., Vol.11 G.B. 1969,pp. 363-385.

Rinn, F., Resistographic inspection of building timber, Proceedings of Pacific Timber Engineering Conference, Gold Coast, Australia, 1994

Rinn, F., Catalogue of relative density profiles of trees, poles and timber derived from Resistograph micro-drillings, Proceedings 9th international meeting on non-destructive testing, Madison, 1993

UNI 11119, 2004, Beni culturali. Manufatti lignei. Strutture portanti degli edifici - Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera

UNI EN 12504-4:2005 Testing concrete – determination of ultrasonic pulse velocity