

Dalla conoscenza dell'edificio alla modellazione strutturale, un percorso obbligato: il caso di due edifici seicenteschi nel contesto valtellinese

ALESSANDRO ARMANASCO, DARIO FOPPOLI

PREMESSA

È ormai consolidata la convinzione che la comprensione del comportamento strutturale di un edificio esistente debba basarsi sulla conoscenza quanto più accurata possibile delle caratteristiche geometriche, conservative, materiche e costruttive dello stesso, cui si può pervenire solamente attraverso un'opportuna campagna di rilievo ed indagine sperimentale. Tale conoscenza è fondamentale non solo per la predisposizione di un modello che rappresenti correttamente il comportamento strutturale del manufatto, ma anche per la sua successiva validazione, che può essere effettuata confrontando i risultati numerici ottenuti dallo stesso con i valori forniti dalle prove in sito: solamente tale riscontro può garantire l'adeguatezza del modello predisposto e quindi può confortare in merito alla validità dei risultati ottenuti.

La presente memoria si inserisce nel contesto di un ampio programma, promosso da Fondazione Cariplo nell'ambito del progetto *Diffondere le tecnologie innovative per la conservazione programmata del patrimonio storico architettonico*, curato sul territorio della provincia di Sondrio dagli scriventi, dal dipartimento BEST del Politecnico di Milano e dal CNR – ICVBC di Milano. Esso ha interessato alcuni edifici ubicati in media Valtellina¹ di proprietà pubblica e privata ed è stato sviluppato in coordinamento con alcuni dei principali soggetti che devono occuparsi della gestione e della conservazione dei Beni Culturali: soprintendenza, enti pubblici, enti religiosi, fondazioni ed associazioni (Foppoli, Guiducci 2012). Il programma ha avuto la finalità di mettere a punto tecniche di conservazione programmata su alcuni edifici posti nel contesto valtellinese a partire da un'approfondita conoscenza delle loro caratteristiche: sono state perciò sviluppate indagini conoscitive mediante analisi materiche, rilievi, monitoraggio termo-igrometrico e dello stato di conservazione delle superfici (Foppoli ed al. 2011, Foppoli ed al. 2012). Sotto l'aspetto strutturale, gli edifici sono stati caratterizzati effettuando un'articolata campagna di indagini diagnostiche e l'evoluzione dei loro fenomeni di dissesto nel tempo è stata controllata installando sistemi di monitoraggio strutturale. Alcuni edifici sono stati anche oggetto di valutazione della sicurezza sia in campo statico sia in campo sismico.

La presente memoria presenta i casi studio che si riferiscono al palazzetto Besta di Bianzone ed alla chiesa di S. Ignazio di Ponte, edifici che risultano particolarmente significativi dal punto di vista strutturale in quanto presentano evidenti fenomeni di dissesto. I manufatti oggetto di analisi, posti a pochi chilometri di distanza l'uno dall'altro, sono rappresentativi di uno dei periodi di maggior sviluppo economico, culturale e artistico della storia valtellinese, il periodo dal 1512 al 1797 durante il quale la valle, sotto il dominio del Libero Stato delle Tre Leghe², per la sua particolare posizione geografica costituì il percorso di collegamento più agevole tra i domini degli Asburgo in Italia (Ducato di Milano) e nell'impero (Ti-

rolo) e di conseguenza assunse un ruolo politico e militare³ assolutamente strategico nel panorama storico del tempo.

Nel seguito vengono fornite alcune informazioni di inquadramento relative ai due edifici e quindi vengono descritte le attività diagnostiche ed analitiche effettuate, commentando i risultati conseguiti.

IL PALAZZETTO BESTA DI BIANZONE

La realizzazione del corpo principale del palazzetto Besta (fig. 1), nel suo impianto attuale, è presumibilmente da collocarsi attorno alla metà del XVI secolo. Sulla base di considerazioni stilistiche e ponendo attenzione ad alcune date incise sulle pareti, la loggia ad est ed il corpo a sud sono stati edificati nella seconda metà del XVII secolo. Le ultime modifiche rilevanti dell'edificio, ovvero il tamponamento delle tre fornici che originariamente caratterizzavano l'ampio atrio di ingresso ed il ciclo decorativo del salone soprastante, risalgono alla metà del XVIII sec., quando la proprietà dell'edificio passò dalla famiglia Besta alla famiglia grigionese dei Planta (1752). In anni recenti l'edificio è stato oggetto di un progressivo degrado causato dal suo completo abbandono fino al 2003, quando i privati proprietari lo cedettero al comune.

Il fabbricato è articolato in tre corpi, disposti ad U attorno ad un cortile centrale. L'edificio principale, posto a nord, ha forma pressoché rettangolare e consta di alcuni ampi vani interrati e di tre piani in elevazione; il loggiato seicentesco, sormontato da un'edicola barocca, è disposto sul lato est del cortile; in continuità ed ortogonalmente ad esso, sul lato sud, sono presenti altri corpi di fabbrica, in parte ad evidente destinazione rurale.

Il complesso è stato realizzato secondo le modalità tipiche dell'edilizia storica valtellinese, ovvero con murature in malta e pietrame ed orizzontamenti costituiti in parte da volte in muratura (in pietra e malta) ed in parte da solai in legno.

L'edificio versa attualmente in un grave stato di abbandono e presenta un evidente quadro fessurativo e deformativo, particolarmente rilevante in corrispondenza del salone al primo piano, dove la marcata spanciatura della volta ha causato il distacco e la parziale caduta degli affreschi della specchiatura centrale, in corrispondenza delle stüe rivestite in legno al primo e secondo piano, dove le infiltrazioni di acque meteoriche hanno causato lo sfondamento di tutti gli impalcati, e dei locali nell'angolo ovest, dove le volte presentano gravi fessurazioni.

LA CHIESA DI S. IGNAZIO DI PONTE IN VALTELLINA

Dopo quasi un secolo di dibattito, nel 1639 «si mise con solenne rito la prima pietra de' fondamenti» della chiesa di S. Ignazio, annessa al convento dell'ordine dei gesuiti. I lavori procedettero in modo piuttosto spedito e già nel 1642, portato a compimento il lavoro di copertura della volta del presbiterio, fu possibile celebrare nell'erigenda chiesa la festa del santo

titolare. Nel settembre del 1653 la chiesa era completata e fu solennemente aperta ed officiata. A partire dagli ultimi anni del XVI secolo fu poi intrapresa l'opera di decorazione parietale interna, portata a compimento con l'affresco che rappresenta *La gloria di S. Ignazio*, realizzato nel 1749 sulla volta della navata. Pochi anni dopo, con la soppressione della compagnia sancita nel 1773, si concludeva la permanenza dei gesuiti a Ponte e quindi aveva termine lo slancio per la realizzazione e la decorazione della chiesa.

L'edificio forma un complesso unico con il vicino ex convento. La chiesa è stata edificata secondo i canoni tipici delle chiese dell'ordine dei gesuiti: a una sola navata, con volte in muratura a botte (a crociera nella campitura centrale) sostenute da profondi contrafforti che inquadrano le cappelle laterali. Il presbiterio è rettangolare e affiancato verso Nord dalla sagrestia e verso sud dal campanile.

Attualmente la chiesa, di proprietà comunale, è interessata da significativi fenomeni di dissesto che si esplicitano in un rilevante quadro fessurativo che interessa principalmente le murature e le volte della campata centrale e della prima campata, oltre che la facciata principale.

LE INDAGINI DIAGNOSTICHE

Gli edifici sono stati oggetto di una accurata ispezione preliminare che ha consentito di identificare i fenomeni di dissesto significativi e di progettare una campagna di indagini diagnostiche finalizzata all'analisi degli aspetti materici e strutturali più rilevanti: la campagna conoscitiva effettuata ha comportato le attività sinteticamente descritte nel seguito.

Il rilievo geometrico è stato realizzato mediante la tecnica laser-scanner che consente di acquisire una nuvola di punti che costituisce un modello geometrico tridimensionale del manufatto. Tale tecnica ha fornito l'identificazione dettagliata della struttura e, integrata da un'accurata ispezione in sito, ha consentito di definire con esattezza il quadro deformativo e fessurativo degli edifici (fig. 2). L'assetto delle strutture fondazionali è stato inoltre rilevato mediante carotaggi sub-verticali nelle murature di fondazione, ispezionati successivamente con video-endoscopia per acquisire anche informazioni materiche relative alle murature stesse.

L'analisi storica è stata effettuata mediante specifiche ricerche d'archivio e l'accurata ispezione in sito dei manufatti finalizzata a cercare riscontri alle circostanze emerse dalla documentazione analizzata. Sono state così acquisite utili osservazioni (p.e. l'individuazione di catene aggiunte in più fasi successive) che sono state nel seguito implementate nei modelli strutturali.

Il rilievo materico è stato eseguito allo scopo di individuare le tecniche esecutive e lo stato di conservazione delle strutture. Le murature in elevazione sono state indagate effettuando carotaggi orizzontali, successivamente ispezionati con video-endoscopia. Le strutture voltate sono state rilevate determinandone la stratigrafia mediante piccoli saggi esplorativi puntuali (realizzati a partire dall'intradosso ovvero dall'estradosso a seconda della sensibilità delle superfici) anch'essi ispezionati con video-endoscopia ed integrati da rilievi non distruttivi con geo-radar. È stato così possibile determinare lo spessore delle volte, dei rinfianchi e delle pavimentazioni soprammesse. Le informazioni puntuali così acquisite sono poi state estese attraverso l'analisi delle riprese termografiche, realizzate sulle murature in modo estensivo a cura del Politecnico di Milano,



1. Palazzetto Besta – nuvola di punti del rilievo laser-scanner.

che hanno consentito tra l'altro di individuare discontinuità, irregolarità, aperture tamponate e canne fumarie.

La caratterizzazione meccanica dei materiali, ove possibile, è stata inoltre associata alla misura dello stato di sollecitazione. Le prove con martinetto piatto hanno consentito di determinare lo stato tensionale e le caratteristiche di deformabilità delle murature in elevazione e di stimarne la resistenza a compressione; sulle catene sono stati eseguiti rilievi dinamici che, analizzando le frequenze proprie di vibrazione delle catene, hanno fornito la valutazione del loro stato di trazione.

Sui terreni di fondazione sono state infine realizzate indagini geotecniche mediante attrezzatura penetrometrica; la presenza di acqua nel terreno è stata poi rilevata mediante indagini geoelettriche effettuate a cura dell'Università di Siena.

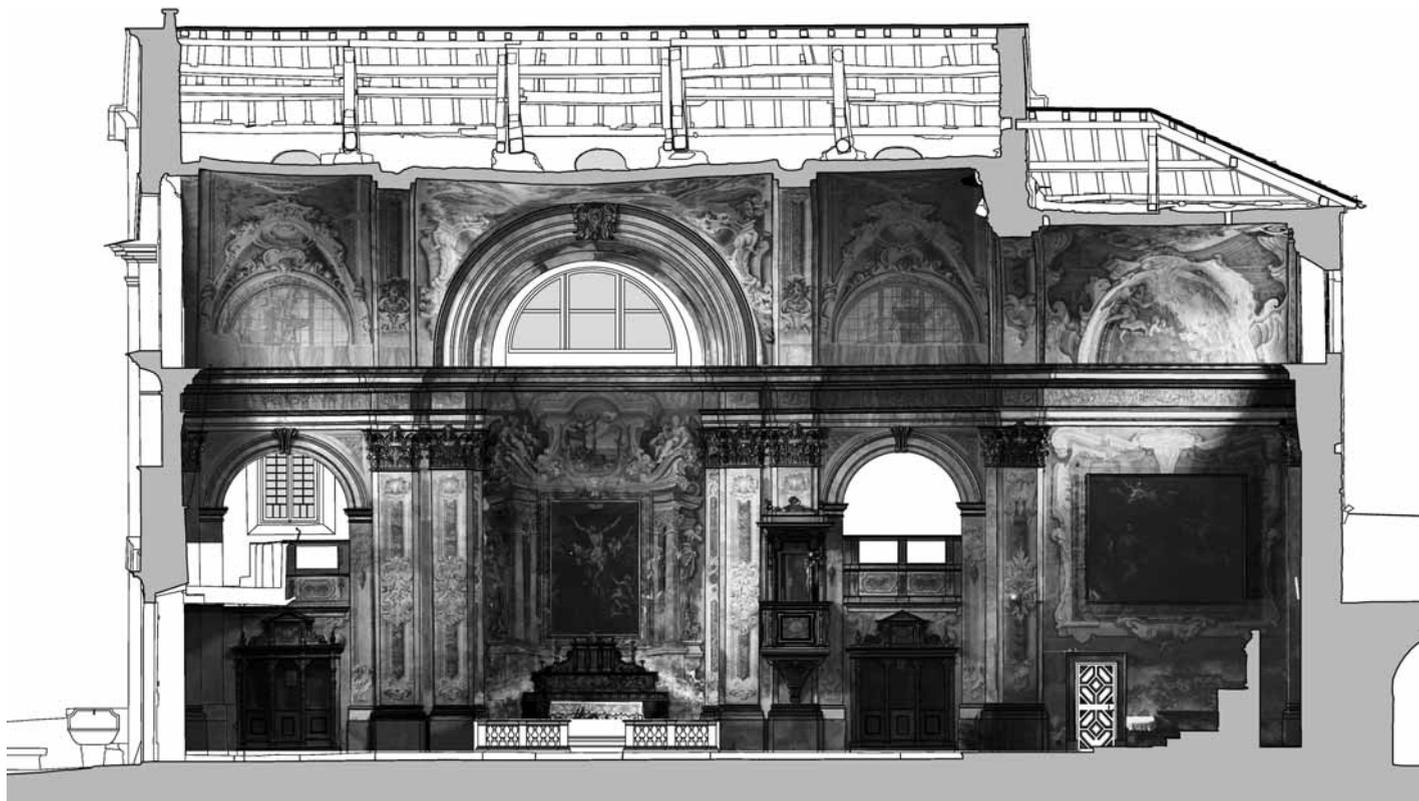
La suddetta campagna di indagine ha consentito di rilevare ed identificare la struttura in modo completo e, in relazione alla quantità ed alla qualità delle prove effettuate, di definire le proprietà meccaniche dei materiali in modo esteso per il Palazzetto Besta e limitato per la chiesa di S. Ignazio: è stato quindi possibile assumere nelle analisi successive fattori di confidenza rispettivamente $FC = 1$ ed $FC = 1,18$.

LA MODELLAZIONE STRUTTURALE E LA VALIDAZIONE DEI MODELLI

Sulla base dei dati geometrici e meccanici raccolti è stato predisposto un modello numerico globale di ciascun edificio rappresentando gli elementi strutturali nello spazio: la geometria degli edifici è stata desunta direttamente dalle nuvole di punti rilevate con laser-scanner. Le murature sono state schematizzate mediante elementi finiti guscio/piastra, piani bidimensionali, mentre gli elementi dei telai strutturali sono stati rappresentati mediante elementi finiti monodimensionali.

I valori di sollecitazione sono stati determinati in prima istanza con l'ipotesi di comportamento elastico lineare dei materiali, considerando tutte le murature perfettamente connesse e collaboranti. Tale analisi ha consentito di individuare le zone in cui gli stati tensionali di trazione eccedono la capacità di resistenza a trazione delle murature (peraltro limitata): tali zone sono state messe in relazione con la posizione delle fessure desunte dal quadro fessurativo, evidenziandone la buona congruenza.

Lungo le linee dove il modello evidenziava i massimi valori di trazione e contemporaneamente il rilievo evidenziava la presenza di fessure, sono stati successivamente sconnessi gli elementi al fine di evitare la trasmissione delle suddette solle-



2. Chiesa di S. Ignazio – sezione longitudinale: già a questa scala risultano evidenti gli spanciamenti delle volte.

citazioni. Tale procedura è stata svolta in modo iterativo arrivando a una ragionevole approssimazione dei fenomeni fessurativi più significativi rilevati sulle strutture ed alla rideterminazione degli stati tensionali.

Questo primo livello di confronto tra i risultati desunti dal modello ed il quadro fessurativo rilevato ha fornito quindi una prima indicazione del comportamento strutturale degli edifici.

Successivamente è stato attuato un secondo livello di confronto mettendo in corrispondenza i dati numerici tensionali e deformativi forniti dal modello ad e.f. con quelli ottenuti dalle prove in sito. È stato così possibile valutare l'influenza dei parametri geometrici e meccanici che condizionano i risultati delle analisi numeriche e di conseguenza l'attendibilità dei modelli predisposti.

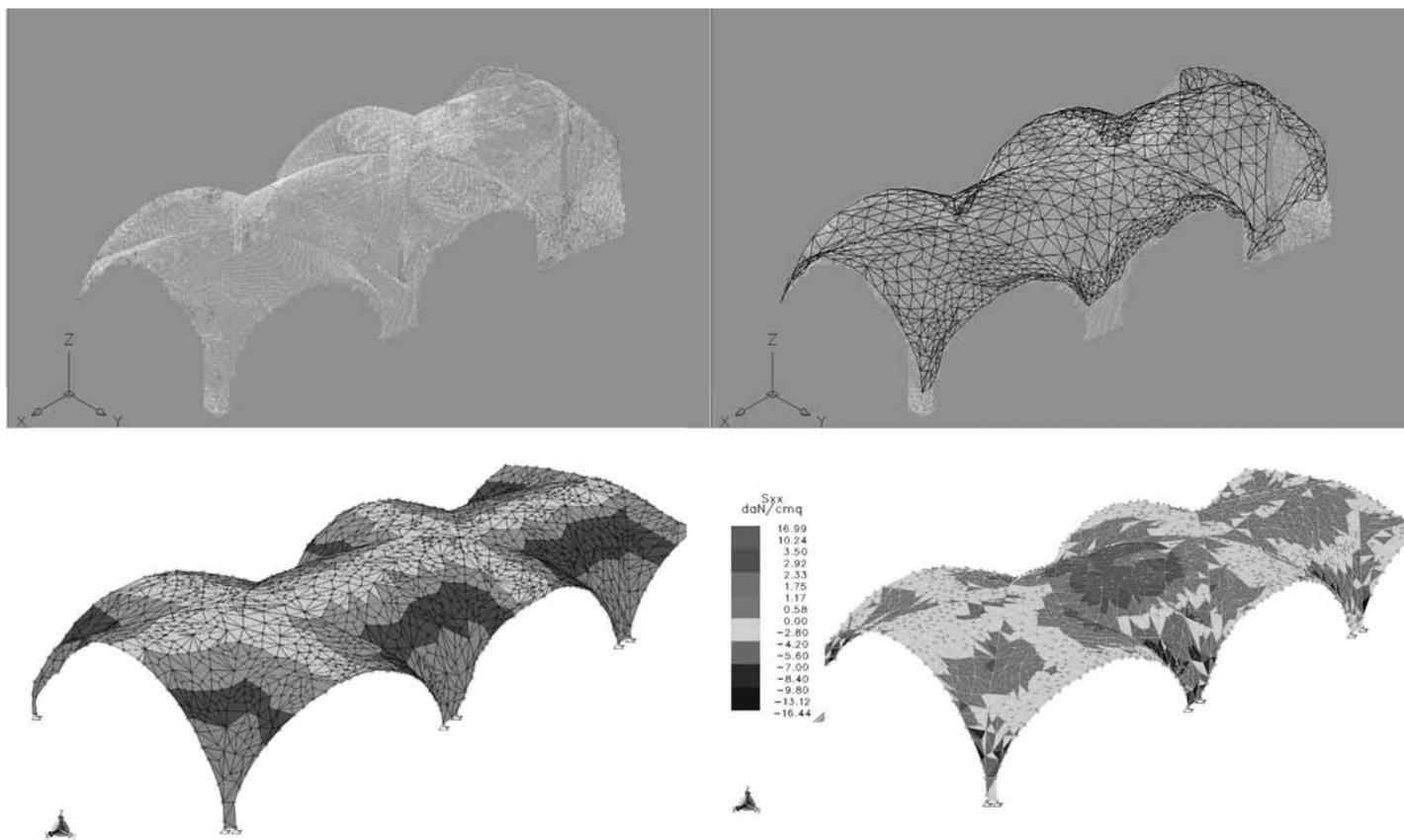
Per il palazzetto Besta lo stato deformativo della facciata principale desunto dal rilievo degli spanciamenti (in particolare quelli più rilevanti, relativi alla facciata principale) è stato confrontato con la deformata calcolata mediante il modello e.f. in campo statico nelle condizioni corrispondenti allo SLE (caratterizzata da coefficienti amplificativi pari a 1). Il quadro deformativo fornito dal modello è congruente con quanto rilevato in sito: solo puntualmente gli spostamenti calcolati risultano più ampi rispetto a quelli misurati, presumibilmente per effetto dei fenomeni deformativi locali e/o delle deformazioni differite nel tempo.

Il confronto ha poi riguardato i valori tensionali: i dati sperimentali rilevati nel corso delle prove con martinetto piatto sono stati confrontati con quelli ottenuti con il modello e.f. nelle condizioni corrispondenti allo SLE. Lo stato tensionale calcolato alla base delle murature perimetrali risulta piuttosto uniforme, evidenziando come, nella parte bassa delle stesse, vi sia una adeguata redistribuzione delle sollecitazioni trasmesse dall'elevazione. Le prove effettuate in corrispondenza del muro

di spina presentano un valore medio molto prossimo a quello fornito dal modello: la disomogeneità sperimentale tra una facciata e l'altra di detto muro può essere attribuita alla marcata disomogeneità materiale della muratura, che risulta peraltro evidente ove si ponga attenzione agli elevatissimi valori di modulo ottenuti in alcuni punti di prova. Analogamente il valore sperimentale rilevato sul muro perimetrale ovest è maggiore del valore ricavato dal modello numerico: anche in questo caso il quadro tensionale fornito dal modello risulta comunque congruente con quanto rilevato in sito.

L'analisi delle volte, trattate come macroelemento, è stata sviluppata con differenti criteri in modo da valutare l'efficacia ed i limiti delle modellazioni effettuate mediante (a) analisi elastiche lineari tridimensionali (b) bidimensionali (c) ed analisi limite (Heyman, 1966). È rilevante osservare che, anche in questo caso, i modelli sono stati realizzati interpolando la nuvola di punti laser-scanner tridimensionale: nel caso del modello ad e.f. tridimensionale (fig. 3) è stata dapprima ridotta la numerosità dei punti della nuvola per pervenire successivamente alla schematizzazione della struttura mediante elementi finiti guscio/piastra triangolari; nel caso del modello bidimensionale si è operato in modo analogo a partire dalle sezioni.

I risultati ottenuti sono stati confrontati tra di loro e con i risultati forniti dalle indagini in sito traendo utili considerazioni comparative sull'applicabilità di detti modelli. Nella sostanza i metodi di analisi forniscono valori della componente verticale della spinta trasmessa ai piedritti molto omogenei (2%) e valori della componente orizzontale della spinta adeguatamente omogenei (12%). Per la volta al piano terreno del palazzetto Besta è stato anche possibile confrontare la spinta orizzontale calcolata con la tensione delle catene rilevata sperimentalmente, ottenendo scostamenti del 7% rispetto al range delle misure rilevate in sito.



3. Palazzetto Besta – Modellazione e calcolo di una vola a crociera a partire dal rilievo.

Nel complesso si è potuto valutare che l'analisi limite è il metodo più affidabile sia per determinare lo stato di sollecitazione e di tensione nelle volte, che per effettuare le conseguenti verifiche (Heyman, 1969); tale analisi non consente invece di cogliere i cedimenti in chiave, che tuttavia, anche quando determinati con gli altri metodi, sono risultati poco rappresentativo delle misure effettuate in sito.

Il modello ad e.f. della chiesa di S. Ignazio è stato invece validato determinando la deformata statica dell'edificio sottoposto ai carichi di norma nelle condizioni corrispondenti allo SLE. e confrontandola con la configurazione di rilievo. Sono stati utilizzati, come elementi di confronto, i cedimenti della sezione trasversale in chiave alle volte ed i cedimenti longitudinali alle imposte delle stesse misurati sul cornicione. Il confronto ha evidenziato che il quadro deformativo ottenuto dal modello è congruente con quanto rilevato in sito, anche se i cedimenti rilevati risultano molto più ampi rispetto a quelli calcolati, presumibilmente per effetto dei fenomeni deformativi di lungo periodo del terreno di fondazione.

GLI INTERVENTI DI URGENZA E IL MONITORAGGIO

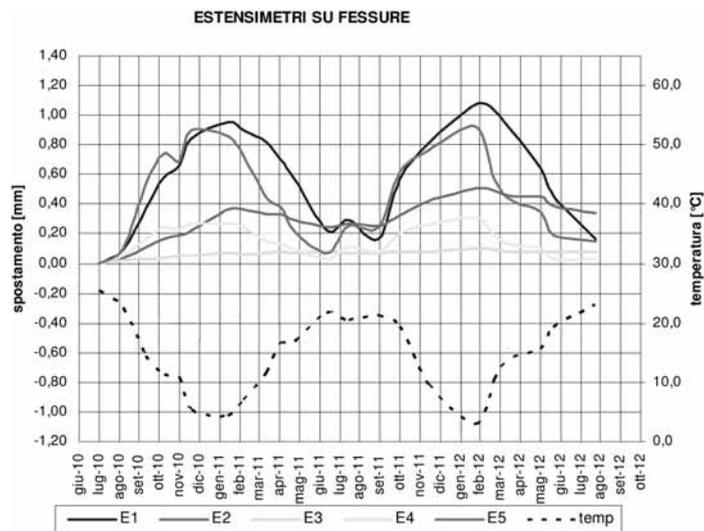
I rilievi, la modellazione e le verifiche preliminari effettuate hanno evidenziato che già in campo statico la situazione strutturale del palazzetto Besta non risultava adeguata. Su incarico della Direzione Regionale per i Beni Culturali della Lombardia è stata quindi effettuata un'operazione di pronto intervento per la messa in sicurezza della struttura operando localmente laddove l'analisi puntuale ha messo in evidenza situazioni di marcata criticità strutturale: sulla facciata è stata installata una struttura provvisoria di contrasto, collegata alle pareti contrapposte mediante tiranti passanti in corrispondenza delle

aperture. Le verifiche sono state ripetute allo stato di fatto e nella situazione consolidata ed hanno consentito di dimensionare la struttura e la tirantatura in modo da garantire il raggiungimento di un adeguato coefficiente di sicurezza. È stata effettuata anche la puntellazione provvisoria delle volte nell'ala ovest del palazzo.

Per controllare l'efficacia degli interventi effettuati e la residua evoluzione nel tempo dei fenomeni fessurativi e deformativi nei due edifici analizzati, sono stati installati sistemi di monitoraggio costituiti da estensimetri elettrici che consentono di misurare le variazioni nel tempo dell'apertura delle fessure e da estensimetri a filo che consentono di misurare gli spostamenti nel tempo delle murature contrapposte.

Per economia e semplicità operativa l'acquisizione delle misure è stata gestita mediante una centralina di eccitazione che viene collegata con periodicità predefinita ai morsetti posti in posizione facilmente accessibile e che consente l'acquisizione dei dati in modo discontinuo. Le letture effettuate per un periodo di due anni hanno fornito 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 (correlazione in fase per quanto riguarda l'apertura delle fessure – che si riduce all'aumentare della temperatura – ed in opposizione di fase per quanto riguarda la distanza tra le pareti contrapposte – che aumenta all'aumentare della temperatura). L'elaborazione statistica delle misure ha anche consentito di discriminare l'eventuale trend residuo.

I dati finora disponibili (fig. 4) confortano in merito all'efficacia degli interventi provvisori realizzati (sia attualmente che nel passato) in quanto non evidenziano trend di lungo periodo che possano indurre ad ipotizzare l'ulteriore evoluzione dei movimenti strutturali già osservati.



4. Chiesa di S. Ignazio – Diagramma di monitoraggio strutturale.

LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA IN CAMPO SISMICO

I modelli numerici realizzati hanno consentito di eseguire le analisi sismiche previste dal D.M. 2008, secondo le procedure previste dal D.P.C.M. 2011.

La valutazione complessiva della risposta sismica del manufatto (livello LV3) è stata effettuata utilizzando i parametri sismici dei siti in esame (gli edifici sono ubicati in zona 4): le verifiche della struttura globale, per mezzo di una procedura iterativa, hanno fornito le accelerazioni che portano alla massima capacità dell'edificio in termini di resistenza (SLV) e di deformazione (SLD) e, confrontate con le accelerazioni caratteristiche del sito, hanno consentito la determinazione degli indicatori di rischio sismico.

Contestualmente è stata eseguita anche la valutazione dei meccanismi locali di collasso per singoli macroelementi (livello LV2): tale analisi è stata svolta verificando mediante metodi dell'analisi limite, con ipotesi di corpo rigido, la stabilità di singoli macroelementi strutturali (facciata ovest della chiesa, muratura perimetrale sud del palazzo ecc.) sotto l'azione ribaltante dei carichi di origine sismica. Per ogni meccanismo locale di collasso ritenuto rilevante per la struttura sono stati calcolati gli indicatori di rischio sismico che sono stati confrontati con quelli desunti dall'analisi globale.

I risultati delle analisi hanno consentito di esprimere la valutazione della sicurezza in campo sismico delle strutture e di fornire indicazioni sugli interventi di miglioramento necessari sia per gli edifici nel loro complesso, che per i singoli macroelementi strutturali, che per le parti non strutturali.

In particolare per la chiesa di S. Ignazio le valutazioni hanno reso evidente come i carichi di origine sismica non provochino un significativo peggioramento delle condizioni di equilibrio né nelle zone che sono già attualmente interessate da fenomeni di dissesto statico (valutazione LV3) né per il macroelemento facciata (valutazione LV2). Dal punto di vista sismico la maggiore criticità risiede invece nell'interazione tra l'abside della chiesa e il campanile, che costituisce una evidente e rilevante irregolarità strutturale.

Analogamente per il palazzetto Besta la verifica sismica non ha segnalato un significativo peggioramento delle condizioni di equilibrio rispetto alla verifica statica segnalando carenze strutturali solamente laddove esse sono già state evi-

denziate dalla concorrenza delle indagini, dei rilievi e delle valutazioni in campo statico.

CONCLUSIONI

Quanto illustrato in precedenza mostra che, per pervenire ad una ottimale conoscenza del manufatto, è importante eseguire una approfondita campagna di indagine che, nei casi in esame, ha comportato l'effettuazione di rilievi con laser-scanner, indagini geotecniche, indagini con geo-radar, prove di vibrazione su catene, carotaggi e video-ispezioni nelle murature e prove con martinetto piatto.

L'acquisizione di questi dati ha fornito le informazioni necessarie per studiare le strutture con differenti modelli strutturali, caratterizzati da un crescente livello di complessità, analizzando sia i singoli macroelementi sia l'edificio nel suo insieme. L'analisi dei valori numerici ottenuti dai modelli e il loro confronto con i dati sperimentali ha messo in particolare evidenza come, per ottenere una affidabile predizione dell'effettivo comportamento dell'edificio, risulta fondamentale verificare l'adeguatezza della modellazione strutturale.

Le valutazioni strutturali hanno consentito di progettare l'esecuzione di specifici interventi provvisori di messa in sicurezza, oltre che l'installazione e la gestione di adeguati sistemi di monitoraggio per controllare l'evoluzione nel tempo dei fenomeni fessurativi e deformativi. Inoltre le verifiche effettuate hanno permesso di evidenziare gli elementi strutturali che, in campo statico ed in campo sismico, risultano caratterizzati da inadeguati livelli di sicurezza.

¹ La chiesa di S. Ignazio a Ponte in Valtellina, il Palazzo Besta di Teglio, il Palazzetto Besta di Bialzone, il Battistero di S. Giovanni a Mazzo di Valtellina.

² Il Libero Stato delle Tre Leghe coincide con l'attuale Canton Grigioni, unito alla Confederazione Elvetica a partire dal 1798.

³ «Mentre quell'esercito se n'andava da una parte, quello di Ferdinando s'avvicinava dall'altra; aveva invaso il paese de' Grigioni e la Valtellina; si disponeva a calar nel milanese». (A. MANZONI, *Promessi Sposi*, cap. XXVIII).

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- D. FOPPOLI, S. GUIDUCCI, *Esperienze di Conservazione Programmata in Valtellina*, in «Kermes», ed. Nardini, Firenze 2012, in corso di pubblicazione.
- D. FOPPOLI, E. ROSINA, M. REALINI, *Un approccio diagnostico non distruttivo funzionale alla conservazione programmata – il caso del palazzo Besta di Teglio (SO)*, Atti della conferenza nazionale sulle prove non distruttive monitoraggio diagnostica, Firenze 2011.
- D. FOPPOLI, M. MOIOLI, M. REALINI, *Le facciate dipinte di palazzo Besta (Teglio). valutazione e gestione del rischio*, Atti del convegno *La conservazione del patrimonio architettonico all'aperto - superfici, strutture, finiture e contesti*, Bressanone 2012.
- J. HEYMAN, *The stone skeleton*. Int. J. Solids Structures, Vol. 2. Pergamon Press Ltd. G.B. 1966, pp. 249-279.
- J. HEYMAN, *The safety of masonry arches.*, Int. J. Mech. Sci., 1969, Vol. 11. G.B., 1966, pp. 363-385.
- D.M. 14/01/2008 *Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni*.
- 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 decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008*.