

# **INDAGINI E MODELLI PER LA VERIFICA SISMICA DI EDIFICI STORICI**

B. Schrefler, C. Modena, E. Cescatti, F. Lorenzoni

Università degli Studi di Padova  
Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale  
via Marzolo, 9 – 35131 Padova

## **Sommario**

*Il tema trattato, di grande importanza ed attualità, è oggetto di particolare attenzione nell'ambito delle norme tecniche riguardanti la sicurezza strutturale, sia a livello nazionale che a livello internazionale, in quanto richiede approcci metodologici e corrispondenti strumenti operativi molto specifici, per molti versi innovativi, rispetto a quelli in uso per nuove costruzioni.*

*Nel seguito vengono sinteticamente richiamati i più significativi principi ispiratori delle sopracitate innovazioni normative e vengono quindi illustrati esempi applicativi della loro possibile traduzione in attività pratiche di valutazione della sicurezza e di progettazione ed esecuzione di interventi atti a migliorarla. Tali esempi sono rappresentativi di diverse tipologie costruttive e di diverse problematiche strutturali.*

## 1. PREMESSA

Le valutazioni di sicurezza strutturale delle costruzioni esistenti, tanto più se di interesse storico-artistico, in particolare quando sono soggette ad azioni sismiche, richiedono approcci “sostanzialmente” diversi da quelli utilizzati per le nuove costruzioni, come ricordano sempre più esplicitamente le più recenti norme nazionali e internazionali del settore. La ISO 13822 [1][2] *Bases for design of Structures – Assessment of existing structures*, ad esempio, dice fra l’altro nella premessa che “*The establishment of principles for the assessment of existing structures is needed because it is based on an approach that is substantially different from design of new structures, and requires knowledge beyond the scope of design codes*”.

Il tema è molto complesso, coinvolge i principi stessi della sicurezza strutturale e i limiti degli approcci ad essa utilizzati nella progettazione delle nuove costruzioni, che possono condurre, quando applicati a costruzioni esistenti, a soluzioni “non sostenibili”.

Prosegue infatti la sopracitata norma precisando che “*Engineers may apply specific methods for assessment in order to save structures and to reduce a client's expenditure. The ultimate goal is to limit construction intervention to a strict minimum, a goal that is clearly in agreement with the principles of sustainable development.*”, e identificando una delle più importanti ragioni che stanno alla base di possibili soluzioni “non sostenibili” dove, al § 7.4 *Plausibility check*, dice che “*The conclusion from the assessment shall withstand a plausibility check. In particular, discrepancies between the results of structural analysis (e.g. insufficient safety) and the real structural condition (e.g. no sign of distress or failure, satisfactory structural performance) shall be explained. NOTE Many engineering models are conservative and cannot always be used directly to explain an actual situation. See also clause 8.*”

Gli stessi concetti vengono ulteriormente precisati nella stessa norma quando si riferisce agli edifici storici (*Annex I – Heritage structures*) nei seguenti termini: “*I.2.3 Limitation of structural intervention. An over cautious approach to structural assessment should be avoided because it can lead to unnecessary structural interventions and result in loss or major alteration of heritage character-defining elements, and ultimately in the loss of authenticity and historic significance of the cultural resource. Furthermore, excessive scope of intervention can add unnecessary cost and compromise the viability of a conservation project, and eventually jeopardize the existence of a cultural resource.*”

È con tutta evidenza in linea con tali principi l’impostazione della normativa tecnica italiana, che ha infatti formalizzato, definendo tre diverse “tipologie di intervento”, la possibilità di effettuare interventi “limitati” (“intervento di riparazione e locale” e “miglioramento”), dando anzi sempre maggiore importanza a questi ultimi, tanto che nella premessa del capitolo 8 della circolare esplicativa delle NTC 2018 sta scritto che l’importanza che le criticità locali assumono negli edifici esistenti, in termini di danni a persone e cose, ha portato, fra l’altro, a considerare con maggiore attenzione gli interventi locali di rafforzamento e gli interventi di miglioramento.

La stessa normativa, inoltre, individua con chiarezza nel percorso della conoscenza, un processo complesso e rigoroso di attività di studio, analisi e sperimentazione, lo strumento sulla base del quale il progettista può effettuare scelte in grado di incidere efficacemente sulla sicurezza delle costruzioni storiche minimizzando gli interventi.

È illuminante quanto è detto in proposito nel § C.1.1 Logica della Norma della circolare attuativa delle NTC 2018, dove si afferma ad esempio che *“La principale differenza tra costruzioni nuove e costruzioni esistenti è rappresentata, in termini progettuali, dalle peculiarità e dalle problematiche connesse alla loro conoscenza.”* e che *“...proprio dalla mancata conoscenza del comportamento delle costruzioni esistenti derivano prevalentemente i risultati non sempre soddisfacenti che gli interventi possono produrre”*.

Nello stesso paragrafo vengono infatti fornite significative indicazioni relativamente alla metodologia di progetto da adottare nel campo delle costruzioni storiche, dove si afferma in particolare che:

*“La sostanziale unitarietà del processo progettuale, purché la conoscenza sia quella effettivamente necessaria nel senso prima evidenziato, non è compromessa neppure dai vincoli di carattere storico, artistico o ambientale che spesso caratterizzano le costruzioni esistenti.*

Le costruzioni storiche, giunte a noi attraversando i secoli, sono frutto di lunghi e complessi processi di trasformazione, adattamento, danneggiamento e riparazione/ricostruzione (anche a seguito di terremoti di intensità non inferiore a quella che, di norma, ha una limitata probabilità di verificarsi durante la “vita utile” di una nuova costruzione); ogni volta si è intervenuti con i metodi di cui la tradizione costruttiva del tempo e del luogo disponeva (non necessariamente analitici, ma non per questo meno efficaci e determinanti). In questo contesto sono maturate le condizioni per cui i tentativi di migliorare il rapporto capacità/domanda modificando il comportamento delle costruzioni esistenti hanno prodotto risultati non sempre soddisfacenti.

Approcci progettuali basati invece sul riconoscimento, mediante adeguati e rigorosi processi di conoscenza, di tutti i possibili fattori di vulnerabilità di una costruzione storica e su interventi volti a ridurli, se non del tutto eliminarli, modificando il meno possibile il comportamento strutturale della costruzione esistente, sono non solo più rispettosi dei criteri di conservazione di valori storico-artistici, ma anche più affidabili ed efficaci dal punto di vista della sicurezza strutturale, come evidenziato anche dalle esperienze maturate in occasione dei più recenti terremoti.”

Altrettanto significativamente viene definito anche quale sia il più idoneo percorso della conoscenza e il corretto rapporto fra gli esiti di tale percorso e la modellazione strutturale, dove si afferma che:

*“Recuperare l’incertezza del “livello di conoscenza” propria del modello di calcolo (incertezza usualmente espressa attraverso un coefficiente moltiplicativo dell’azione) ricorrendo soltanto a un coefficiente riduttivo della resistenza dei materiali può enfatizzare eccessivamente l’importanza delle indagini sui materiali, che restano comunque indispensabili.*

Ciò porta talvolta a sottostimare l’importanza delle indagini relative ai dettagli costruttivi, alla connessione dei vari elementi tra loro, alle loro modalità di interazione e di collasso; questi elementi sono invece fondamentali per identificare le criticità presenti e irrinunciabili per individuare il modello di calcolo globale (che descrive il comportamento d’insieme della costruzione) e i modelli di calcolo dei meccanismi di collasso locali.

Come si vede, le revisionate NTC sono esplicite in merito a quali siano le indagini da compiere ovvero quelle finalizzate a far emergere eventuali criticità presenti e a individuare i vari modelli di calcolo necessari per descrivere comportamenti globali e locali.”

Il “processo della conoscenza” è quindi qualcosa di ben diverso ed ha un ruolo ben diverso dal controllo di qualità utilizzato nelle verifiche strutturali delle nuove costruzioni.

Il controllo sui materiali serve, ma ha un ruolo secondario: basti pensare a tale proposito che i valori dei parametri meccanici ottenuti sono affetti da grandi e ineliminabili incertezze, legate sia ai limiti delle tecniche di indagine disponibili che alla grande varietà di tipologie murarie presenti nello stesso edificio, spesso frutto di interventi passati, ed alla pratica impossibilità di ottenere risultati statisticamente significativi, tanto che le nostre norme prevedono anche la possibilità di riferirsi a tabelle di valori preassegnati a prefissate tipologie riconosciute tramite ispezioni visive, senza contare il ruolo sempre più importante attribuito ai giudizi esperti ed alla modellazione strutturale per “blocchi rigidi”, che prescinde dai valori dei parametri meccanici dei materiali.

È molto importante invece il contributo offerto da tecniche di indagine non distruttive, che forniscono risultati qualitativi ma di gradevole utilità nella validazione sia dei risultati delle limitate, quando disponibili, indagini distruttive sia dei contributi di conoscenza offerti dalle indagini storiche e dai “giudizi esperti”, oltre ad essere insostituibili nella identificazione delle fondamentali “criticità locali”. Esse offrono inoltre essenziali e insostituibili contributi alla calibrazione dei vari possibili modelli di calcolo utilizzabili, ed alcune di esse consentono di mettere in atto controlli continui nel tempo (monitoraggi) utili sia a supporto delle decisioni progettuali quando eseguiti tempestivamente a tale scopo sia a controllare l’efficacia degli interventi eseguiti.

## **2. ARCA DI CANSIGNORIO – VERONA**

L’Arca di Cansignorio è, oltre che importante monumento scultoreo funebre, anche una “costruzione” – un piccolo, particolarissimo “edificio” – che, come tale, si presenta come caso esemplare di applicazione dei più recenti approcci metodologici alla conservazione del costruito storico, ormai consolidati anche in disposizioni normative.

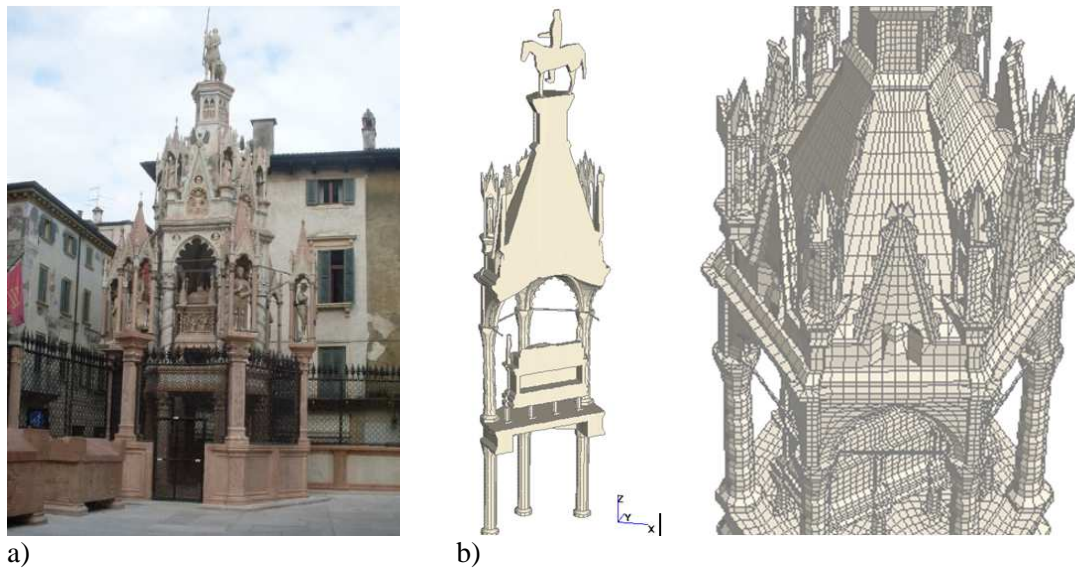


Figura 1 – Arca di Cansignorio (a) e modello strutturale (b)

Si è trattato, in particolare, di progettare ed eseguire interventi rispondenti a stringenti criteri di “restauro conservativo” – attenti alla salvaguardia di valori storici ed artistici – ed allo stesso tempo in grado di garantire, con margini di sicurezza adeguati, che la costruzione non rappresenti un pericolo per l’incolumità di chi passa accanto, o accede per la visita, al sito monumentale. In tale contesto assume particolare rilevanza l’accentuazione avvenuta a livello normativo, sotto la spinta degli effetti di recenti terremoti, delle problematiche connesse con il “rischio sismico”, e cioè con la conclamata necessità di effettuare valutazioni di “vulnerabilità sismica” (tendenza a subire danni – effetti cioè in grado di mettere in pericolo sia il valore storico e artistico che la pubblica incolumità – sotto l’azione di terremoti) degli edifici storici, e di provvedere quindi alla sua mitigazione attraverso interventi di “miglioramento sismico”.

La soluzione proposta sul piano “ingegneristico” si basa su due cardini:

- la “conoscenza”, e cioè lo studio e l’analisi approfondita delle caratteristiche costruttive e di tutte le reali risorse per quanto riguarda il comportamento statico, della “costruzione” esistente, per valorizzarne al massimo le potenzialità, anche al di fuori degli approcci classici utilizzati per affrontare i problemi della sicurezza strutturale nelle nuove costruzioni;
- la “tecnologia”, che offre soluzioni per “potenziare” le risorse strutturali proprie delle costruzioni storiche, e che mette a disposizione materiali e tecniche di intervento in grado di offrire elevate prestazioni strutturali con ingombri minimi.

Nel caso in esame sono state messe in atto tutte le azioni atte a consentire, con gli strumenti e le tecniche più avanzate, il più elevato grado di conoscenza possibile del manufatto storico, sia per quanto riguarda il degrado dei materiali, sia per quanto riguarda il comportamento strutturale, sia in campo statico che in campo dinamico/sismico. In particolare, sulla base di un accurato rilievo tridimensionale (eseguito con laser scanner) e delle caratterizzazioni dei materiali e delle struttura nel suo insieme ottenuta attraverso le indagini svolte, è stato costruito un preciso modello di calcolo ed attivato un sistema di monitoraggio strutturale in grado di fornire in tempo reale informazioni preziose sullo “stato di salute” (non a caso la definizione inglese di questa tecnica di indagine è SHM “structural health monitoring”) del monumento [3].

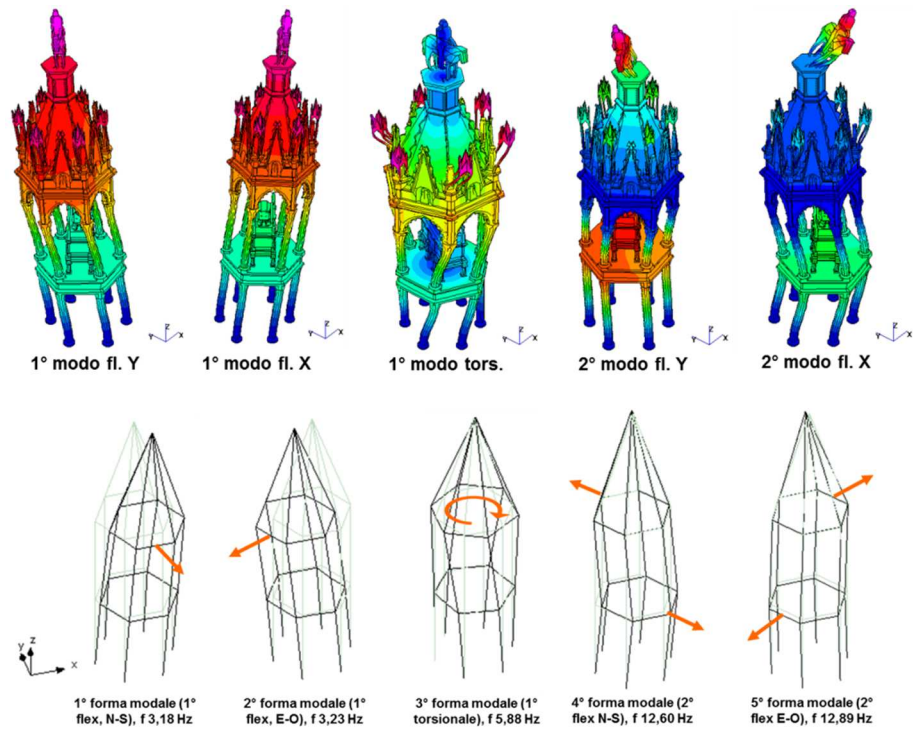


Figura 2 – Analisi numerica e sperimentale del comportamento dinamico del monumento



Figura 3 – Il sistema di monitoraggio strutturale (SHM)

Per quanto riguarda la tecnologia, si sono privilegiati interventi “migliorativi” della sicurezza strutturale, anche sotto le azioni sismiche, molto semplici e molto localizzati, eseguiti con materiali avanzati (acciaio inox, anche in funi con sezioni millimetriche, titanio, fibra di carbonio) di alte prestazioni, anche



per quanto riguarda la durabilità nel tempo, e comunque facilmente rimovibili. Gli elementi di consolidamento, salvo quelli adottati per situazioni di degrado particolarmente gravi, come quelle che interessavano gli appoggi della statua equestre o delle statue dei santi Quirino e Valentino, sono stati infatti messi in opera a secco, evitando l'impiego di ancoranti chimici e limitando il più possibile l'esecuzione di fori o di nuove sedi di alloggiamento sul manufatto lapideo.

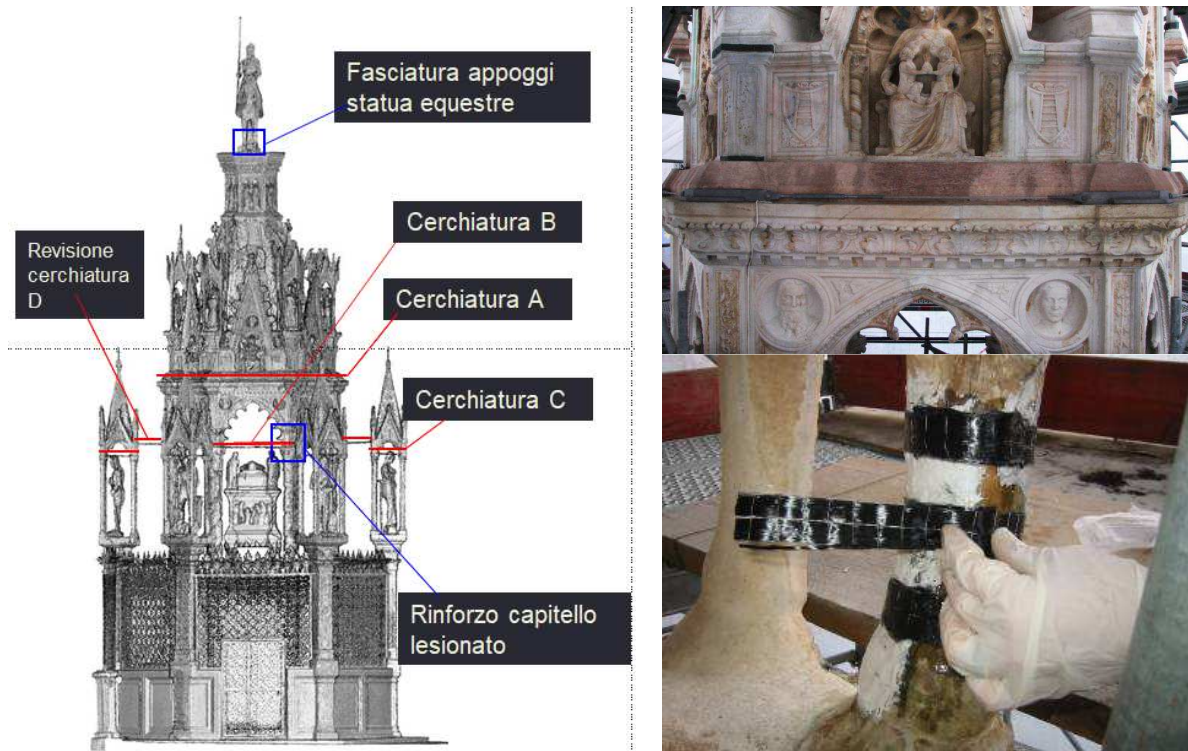


Figura 4 – Interventi di consolidamento strutturale eseguiti

### 3. FORTEZZA SPAGNOLA – L'AQUILA

Il Forte Spagnolo è situato a Nord-Est del centro storico della città de L'Aquila a dominare l'ampia valle dell'Aterno. Il castello appartiene alla tipologia delle fortezze a pianta quadrata con bastioni angolari.

Essa presenta una struttura regolare formata da quattro bastioni triangolari posizionati agli angoli di un quadrato con lato di circa 100 metri. I lati del quadrato costituiscono i corpi principali che si articolano attorno ad un cortile interno di lato pari a circa 50 metri. L'intero edificio è circondato da un fossato largo 25 metri e profondo 12 metri.

In seguito al terremoto del 6 aprile del 2009 il Forte ha riportato numerosi danni gravi, maggiormente significativi nei piani più elevati dell'edificio. Tra i danni principali riportati in seguito al sisma si notano: meccanismi di ribaltamento, rotture a pressoflessione e taglio delle pareti; collassi locali e danni agli impalcati o alle volte. Nel loro complesso i danni riportati dall'edificio risultarono essere di rilevante entità, tali da rendere la fortezza inagibile e di comprometterne la sicurezza strutturale.

Nel mese di settembre 2009, dopo l'esecuzione di interventi provvisori di messa in sicurezza da parte dei Vigili del Fuoco (VVF), sono iniziate le campagne di indagini sperimentali sulla Fortezza Spagnola [4]; l'obiettivo è stato quello di affinare ulteriormente la conoscenza del manufatto e del suo stato dal punto di vista strutturale, a seguito del sisma. Tali indagini sono state svolte dall'Università di Padova e dal Politecnico di Milano e sono consistite in campagne di prove sia non distruttive che debolmente

distruttive: i) prove soniche; ii) radar test; iii) prove di identificazione dinamica; iv) termografia attiva; v) prove di martinetto piatto singolo e doppio.



Figura 5 – Vista aerea della Fortezza Spagnola a l’Aquila (a) e pianta del piano terra (b)



Figura 6 – Danni subiti dalla Fortezza in seguito al sisma del 6 Aprile 2009

Sono stati installati inoltre dei sistemi di monitoraggio sia statico che dinamico al fine di tenere sotto controllo lo stato di danneggiamento della struttura e verificare in tempo reale il possibile aggravarsi della situazione statica dell’edificio.

In particolare i test sonici sui pilastri del porticato interno del lato Sud-Est e sul muro di cinta esterno a Sud-Ovest, sono stati eseguiti per comprendere qualitativamente le caratteristiche di queste strutture murarie, al fine di ottenere informazioni riguardo alla loro composizione interna. Si è scelto di effettuare i test sia su di un pilastro danneggiato dal sisma sia su di uno integro, con lo scopo di avere la possibilità di un confronto fra i due e di individuarne le principali lesioni. Nel pilastro integro è stata accertata la



buona qualità e compattezza del materiale anche all'interno del pilastro, nonostante il materiale in superficie sia lievemente migliore per ovvie ragioni estetiche e di pratica costruttiva.

E' stata inoltre eseguita una campagna di prove di identificazione dinamica sul braccio Sud-Est al fine di caratterizzare le frequenze naturali di vibrazione proprie della struttura. Le lesioni continue su tutta la lunghezza degli orizzontamenti, che sembravano dividere in due l'ala Sud-Est, hanno portato alla programmazione dei test dinamici. Dall'elaborazione complessiva dei dati è stato possibile identificare chiaramente il primo modo flessionale fuori piano, corrispondente alla frequenza di 2,93 Hz, emerso in tutte le acquisizioni eseguite. Il fatto che si identifichi un modo di vibrare complessivo della struttura indica, in prima analisi, che l'edificio possiede ancora, nonostante l'elevato livello di danneggiamento e lo scollegamento dei prospetti, caratteristiche di unitarietà nella risposta dinamica lungo i due fronti, presumibilmente anche grazie agli interventi di confinamento mediante funi realizzati dai VVF.

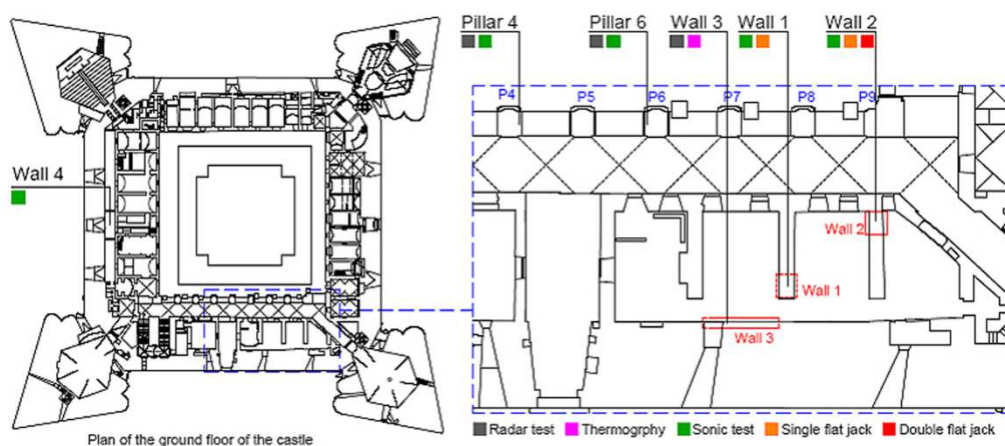


Figura 7 – Piano di indagini conoscitive eseguite presso la Fortezza

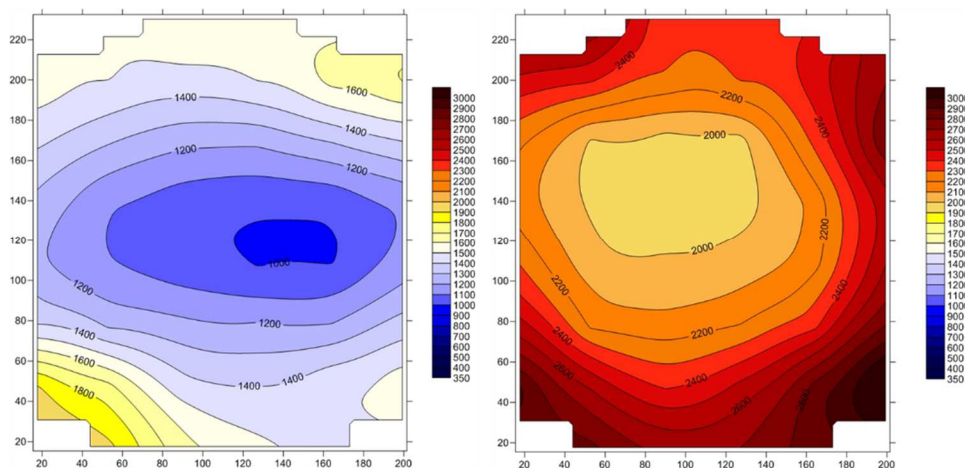


Figura 8 – Risultati delle prove soniche tomografiche: confronto della distribuzione delle velocità soniche in un pilastro danneggiato (a sinistra) e in un integro (a destra)

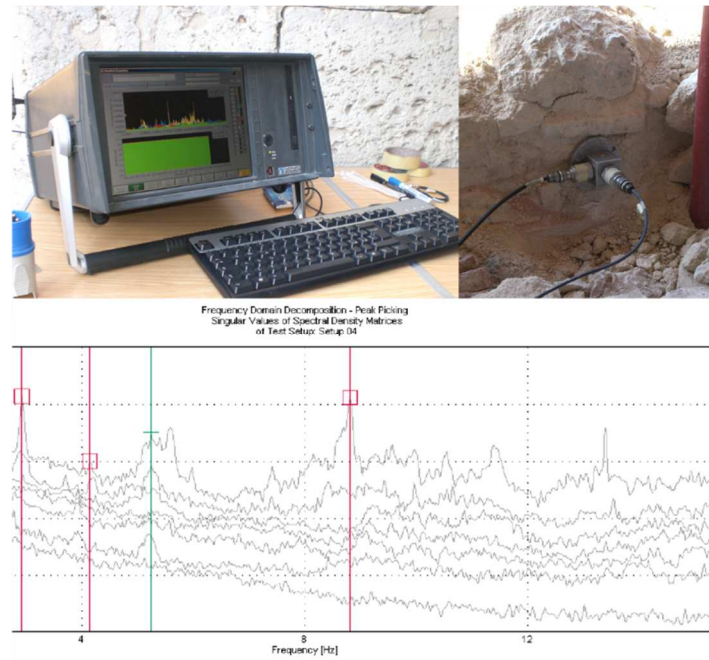


Figura 9 – Prove di identificazione dinamica sperimentale

L'estesa campagna di indagini sperimentali condotte sulla Fortezza Spagnola ha consentito di raggiungere un livello di conoscenza adeguato della condizione statica della struttura dopo il terremoto e di arrivare in tempi rapidi alla definizione e progettazione dei principali interventi di consolidamento strutturale dell'edificio. I suddetti interventi mirano alla stabilizzazione strutturale del castello, con introduzione di elementi di rinforzo generalizzato in modo da conseguire un deciso miglioramento sismico.

Si fa notare che l'impianto generale strutturale possiede già delle discrete caratteristiche sismo-resistenti, relative alla struttura scatolare del fabbricato (presenza di volte e solai ai piani), all'ampio spessore della muratura verso il fossato e alla presenza di murature di spina, dal piano terra al secondo. Si ritiene che i danni riportati in seguito al sisma del 6 aprile 2009 siano principalmente ascrivibili alla carenza di legature tra i due prospetti, cortile e fossato, per l'eliminazione dei tiranti storicamente presenti, ed alla presenza di orizzontamenti pesanti in sommità (soprelevazione ottocentesca, solai in laterocemento). Gli interventi previsti sono di carattere prevalentemente "tradizionale", e conseguono gli obiettivi prefissati (miglioramento della risposta sismica) senza alterare lo schema strutturale preesistente. Si prevede dunque: riparazione delle strutture murarie con la tecnica dello scuci-cuci, sarcitura delle lesioni con miscele a base di malte di calce idraulica, locali ricostruzioni murarie con metodologia tradizionale, rinforzo delle volte tramite placcaggio con fasce di fibra all'estradosso.

Di notevole interesse dal punto di vista ingegneristico-strutturale risulta essere l'intervento previsto per migliorare le condizioni di lavoro dei massicci pilastri del braccio Sud-Est disposti sul fronte del cortile, attualmente danneggiati per il ribaltamento complessivo del prospetto. Si prevede l'iniezione di malta di calce idraulica antiritiro nelle macroscopiche lesioni causate dal ribaltamento del fronte e la successiva esecuzione di un taglio orizzontale nel pilastro nel lato di massima compressione (Fig. 15). In tal modo si vuol favorire una redistribuzione delle tensioni all'interno del pilastro stesso, riducendo notevolmente l'eccentricità del carico e scaricando la porzione di muratura sul lato cortile, attualmente già in crisi per schiacciamento.

Con il presente lavoro è stato seguito un approccio multidisciplinare allo studio e all'analisi di edifici storici colpiti dal terremoto aquilano. Nel processo conoscitivo e di analisi del manufatto è stato essenziale combinare ed incrociare i dati emersi dalle varie discipline. Le notizie raccolte tramite

L'analisi storica, i dati emersi dall'analisi conoscitiva dello stato attuale e di danno e i risultati ottenuti dalle campagne di prove sperimentali in situ sono complementari e hanno permesso di incrementare il livello di conoscenza dell'edificio. In particolare le indagini sperimentali hanno consentito di identificare il livello di danneggiamento della struttura e hanno fornito le basi per la progettazione degli interventi di ricostruzione e restauro le cui fasi di esecuzione saranno costantemente controllate e indirizzate grazie ai sistemi di monitoraggio installati e già operativi.

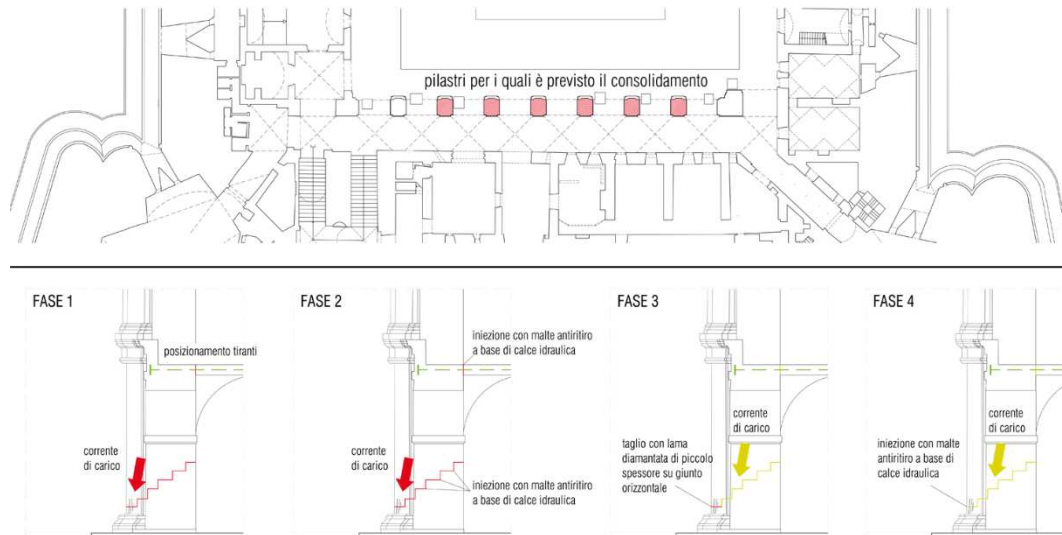


Figura 10 – Interventi di consolidamento strutturale dei pilastri del cortile interno

#### 4. ARENA DI VERONA

L'Arena di Verona rappresenta una delle più importanti testimonianze dell'architettura romana giunte fino ai giorni nostri. Il monumento conserva, nonostante i crolli e i danneggiamenti subiti nel corso dei secoli, e grazie all'originaria robustezza strutturale, le caratteristiche essenziali dell'assetto e delle peculiarità architettoniche originarie.

A pianta ellittica, i cui assi misurano 75,68 m e 44,43 m (rispettivamente 250 e 150 piedi romani), ha la struttura portante costituita da setti radiali separati da 72 arcovoli e da tre gallerie ellittiche concentriche. Fa parte integrante del monumento il "vallo", in gran parte coincidente con l'anello più esterno dell'anfiteatro, di cui rimane traccia fuori terra nella cosiddetta "ala dell'Arena".

L'Arena di Verona ha subito numerosi crolli e successive ricostruzioni nel corso dei secoli che hanno determinato una sostanziale evoluzione del monumento dal punto di vista architettonico-strutturale. Le fonti sono concordi nell'attribuire a cause naturali i maggiori danni al monumento: sicuramente l'inondazione del 589, ma anche i terremoti del 1116 e del 1117 recarono gravi lesioni alla struttura. La stessa trasformazione in fortezza, in età medioevale, sottopose l'anfiteatro ad ulteriori danneggiamenti, ma forse il maggior guasto si ebbe quando venne trasformata in cava per alimentare, con metodica continuità, le nuove costruzioni della città.

Risale invece alla metà degli Anni '50 del secolo scorso il progetto e la realizzazione di un intervento di consolidamento dell'Ala a cura dell'Ing. Riccardo Morandi. L'intervento consistette nell'introduzione di cavi di acciaio armonico pre-tesi (18 cavi del diametro di 5 mm) in ciascuna delle cavità verticali, del diametro di 40 mm, praticate nella pietra in numero di 6 per ciascun pilastro. Ancoraggi furono previsti, in basso, in appositi fornelli scavati nei pilastri a quota +9.00 m in corrispondenza dell'intradosso delle volte e in sommità, a quota +26,90 m, in corrispondenza di un cordolo scavato nei blocchi di pietra.

A partire dal 1996 il Comune e la Soprintendenza Archeologica del Veneto hanno avviato uno studio per definire e mettere in atto gli interventi più adatti a contrastare efficacemente il progressivo avanzamento dei fenomeni di degrado che interessavano l'Arena, in particolare quelli di carattere chimico-fisico, minanti l'integrità dei materiali su tutte le superfici esposte agli agenti atmosferici. La fase preliminare ha riguardato la conoscenza delle reali ed oggettive condizioni di salute del monumento, attuata attraverso studi scientifici paralleli e complementari, che si sono protratti fino ad oggi con gli ultimi interventi sull'Ala e l'installazione di un sistema di monitoraggio strutturale permanente.

In particolare il comportamento dinamico dell'Ala, ed in particolare la sua interazione con il corpo principale dell'anfiteatro, è stato studiato sperimentalmente per mezzo di prove dinamiche, ambientali e forzate, sia impulsive che stazionarie eseguite nel 1996 e successivamente ripetute nel 2010 prima dell'installazione del sistema di monitoraggio strutturale. Grazie all'implementazione di algoritmi specifici per l'analisi modale è stato possibile identificare 7 frequenze naturali di vibrazione dell'Ala nel range 1-11 Hz ed estrarre le corrispondenti forme modali e fattori di smorzamento. La ripetizione dei test nel 2010 ha confermato la bontà dei risultati ottenuti nel 1996. I parametri dinamici identificati sono indispensabili per la determinazione della risposta dinamico-sismica dell'Ala e per la successiva calibrazione e validazione di modelli numerici di riferimento.

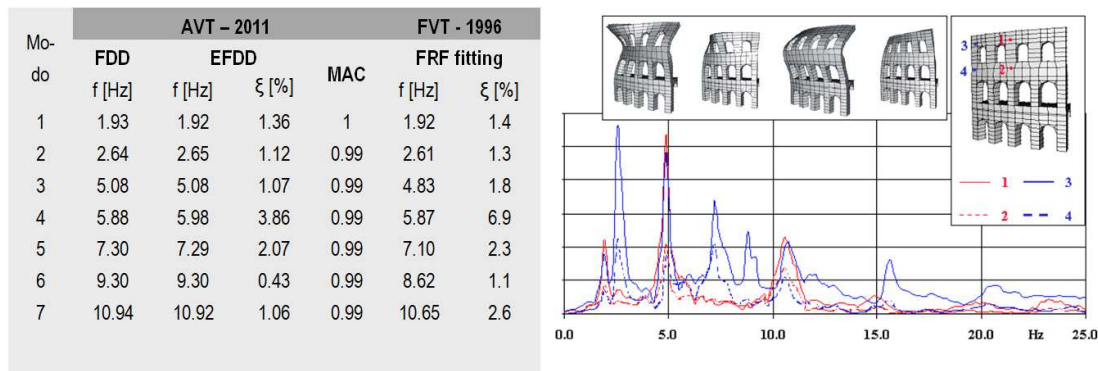


Figura 11 - Risultati comparativi delle prove di identificazione dinamica forzate (1996) e ambientali (2010); modi di vibrare identificati

La prosecuzione delle attività diagnostiche avviate nel 1996 ha previsto nel 2010-11 la definizione, il progetto e la successiva installazione di un sistema di monitoraggio strutturale permanente. Scopo del monitoraggio è quello di controllare determinate grandezze fisiche direttamente correlabili al comportamento meccanico-strutturale dell'edificio e all'evoluzione di possibili fenomeni di danno e/o deterioramento in corso. Sulla base delle indagini in sito condotte si è quindi deciso di definire una rete di sensori distribuiti collegati ad un'unità di acquisizione al fine di monitorare i parametri strutturali significativi relativi sia a situazioni locali (lesioni - danneggiamenti locali) che globali (comportamento dinamico) della struttura [3][6].

Il sistema statico è concepito in maniera da controllare la tendenza deformativa di alcuni elementi strutturali dell'Arena, con particolare riferimento a situazioni locali di danneggiamento o fessurazione rilevati nel corso delle ispezioni e indagini eseguite. Il controllo consente di evidenziare eventuali variazioni dimensionali dell'attuale quadro lesivo e di relazionare tale evenienza ai cicli termigrometrici stagionali o a fenomeni di differente natura (ad esempio danno strutturale).

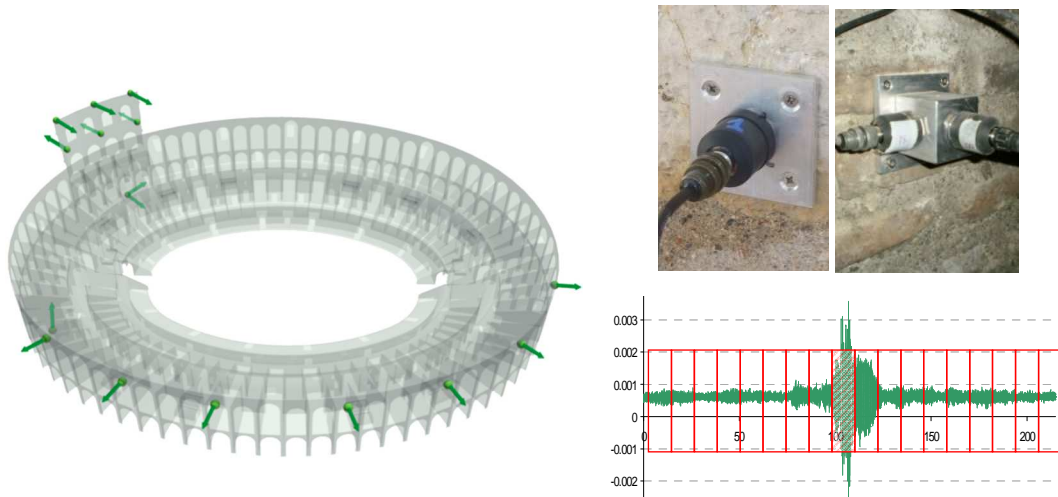


Figura 12 - Layout del sistema dinamico per il controllo globale della struttura: posizione dei 16 accelerometri installati

Il sistema dinamico si compone di sensori di accelerazione utilizzati per l'identificazione della risposta dinamica e l'estrazione dei parametri modali sia in condizioni operative (vibrazioni ambientali indotte da vento, traffico, microtremori, ecc) che in caso di eventi eccezionali quali i terremoti. Gli accelerometri sono stati installati nelle posizioni più adatte per l'acquisizione dei dati relativi alla caratterizzazione dei parametri modali della struttura, o di sottoinsiemi di essa, in relazione a opportuni modelli ad elementi finiti di riferimento. Una terna di sensori sono stati installati alla base secondo direzioni ortogonali per la caratterizzazione degli input sismici in caso di terremoti.

Ad oggi non si segnalano particolari situazioni di pericolo o aggravamenti del quadro di danno. La risposta sismica della struttura, in occasione dei terremoti di lieve entità che l'hanno colpita a partire dagli sciami sismici di gennaio 2012, è rimasta pressochè in campo elastico e le accelerazioni registrate, sebbene in taluni casi percepite distintamente dalla popolazione, hanno in realtà avuto effetti modesti se non trascurabili sulle strutture esaminate. I dati acquisiti consentono di aggiornare costantemente e in maniera precisa i modelli numerici di riferimento che sono in grado quindi di simulare in maniera più efficace i diversi stati di sollecitazione cui è sottoposta l'Arena (eventi sismici, ma anche traffico, vento, concerti, ecc.).

L'estesa fase di indagini diagnostiche sperimentali ha consentito la creazione e successiva calibrazione e validazione di modelli strutturali comportamentali di riferimento sia di tipo analitico che numerico. Grazie alla definizione di tali modelli è stato possibile condurre analisi e verifiche statiche e analisi di vulnerabilità sismica dell'anfiteatro, mettendo in luce le principali criticità del monumento dal punto di vista strutturale. Le verifiche sismiche sono state condotte in accordo con le più aggiornate normative sismiche italiane e hanno previsto analisi sia a livello locale che globale dell'anfiteatro.



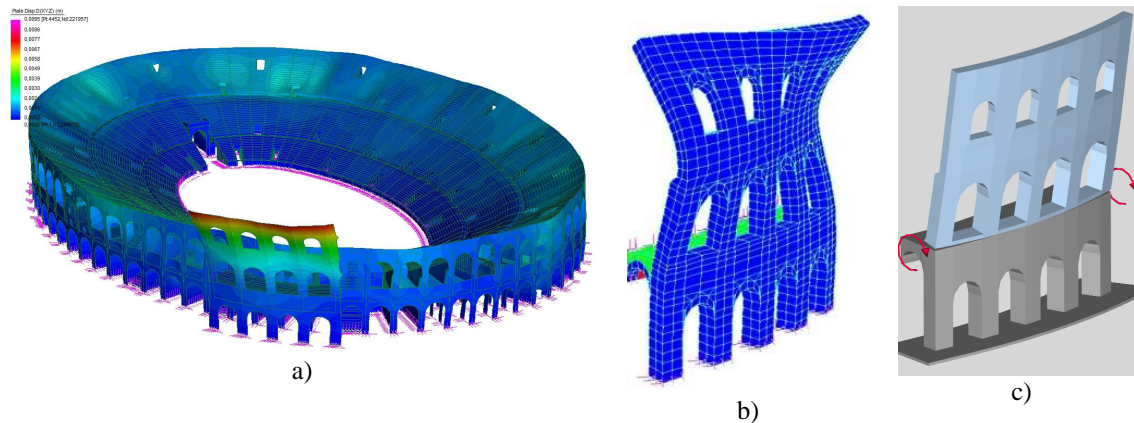


Figura 13 - Modelli globali FEM dell'anfiteatro (a) e dell'Ala (b);  
Modello cinematico locale dell'Ala per l'analisi limite (c)

Dai risultati delle analisi compiute si può affermare che l'edificio, dal punto di vista sismico, presenta un discreto livello di sicurezza, sia nei confronti del danneggiamento che nei confronti del collasso, confermando la capacità della costruzione di resistere ad eventi eccezionali quali i terremoti, da non escludere, tenuto conto della storia sismica del territorio veronese.

## 5. HIERAPOLIS DI FRIGIA (TURCHIA) – “TERME-CHIESA”

Situate nella zona settentrionale extraurbana adibita a necropoli dell'antica Hierapolis di Frigia (Turchia), le cosiddette “Terme-Chiesa” rappresentano certamente uno degli edifici più maestosi per proporzioni e parti conservate all'interno del parco archeologico. Agli occhi del visitatore si presentano gli estesi resti delle strutture originarie che portano i segni degli innumerevoli terremoti che hanno colpito il sito e causato parte dei crolli che circondano oggi l'antico edificio. La conservazione delle “Terme-Chiesa” si inserisce nel progetto di creazione del parco arqueo-sismologico di Hierapolis, tra i cui obiettivi non vi è la sola trasmissione delle informazioni storico-archeologiche ma anche degli effetti dei terremoti sugli edifici. In questo contesto è nata la necessità di approfondire lo studio su questo imponente edificio per conservarne i segni di eventi e vicissitudini susseguitisi in quasi duemila anni di storia.

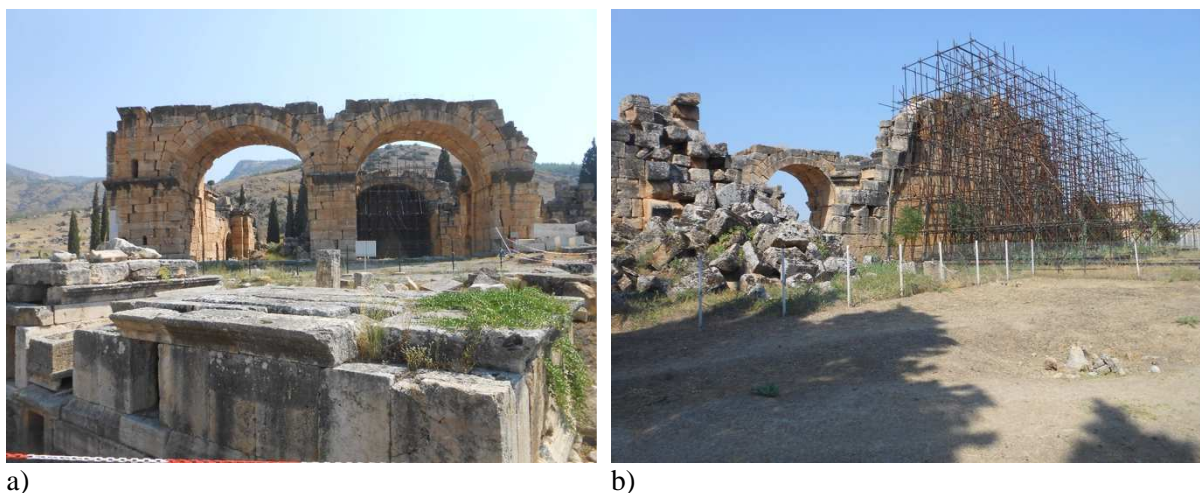


Figura 14 – Vista da sud-ovest (a) e da sud-est (b) del complesso denominato “Terme-Chiesa”

Al fine di conservare e tutelare il complesso delle “Terme-Chiesa”, valorizzando i segni che lo stesso porta, dal 2013 un approfondito percorso di studio ed analisi è stato svolto da parte di team dell’Università degli Studi di Padova, coinvolgendo diversi gruppi di ricerca, in una collaborazione multidisciplinare. Gli interventi finalizzati alla conservazione sono conseguenza dei risultati delle analisi strutturali. Queste, per essere condotte con un buon livello di affidabilità e dare conseguenti risultati attendibili, richiedono informazioni derivanti da studi, ricerche ed indagini sperimentali, attinenti a diverse discipline.

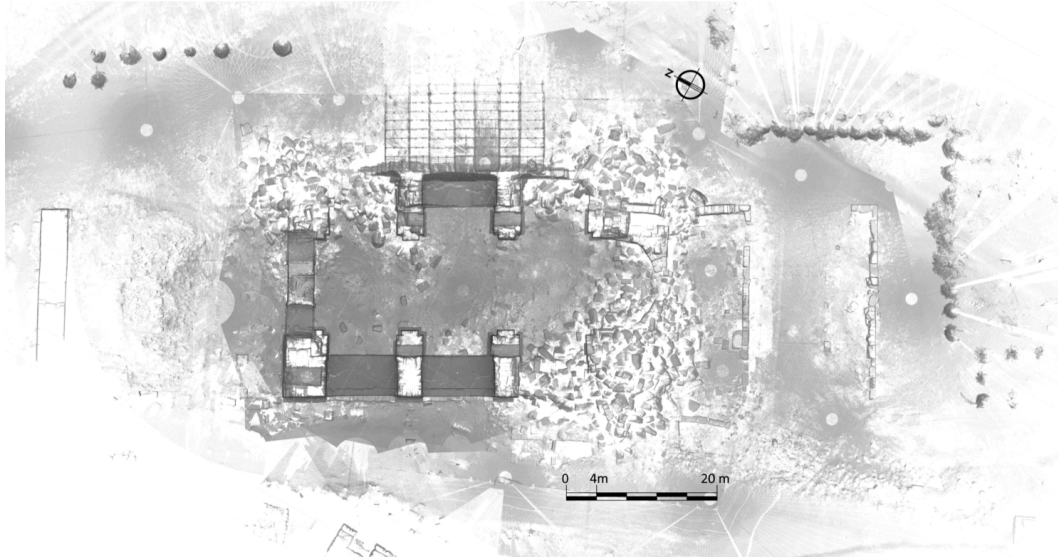


Figura 15 – Planimetria generale del complesso “Terme-Chiesa”

Il percorso rivolto alla conoscenza delle “Terme-Chiesa” non si è limitato all’edificio in oggetto ma è stato esteso all’intero sito di Hierapolis, cui è strettamente connesso. Il metodo si articola in due fasi principali. Una prima, preliminare, di inquadramento di sito dal punto di vista geografico e, per la specificità del caso, geologico nonché storico-archeologico. La seconda fase ha carattere strettamente sperimentale. Si sviluppa in una serie di indagini e prove eseguite sia in sito che in laboratorio per lo studio del terreno, delle strutture e dei materiali. Vengono quindi acquisite tutte le informazioni necessarie per addentrarsi nella parte di calcolo strettamente ingegneristico. Sono infine i risultati dell’analisi analitico-numerica che identificano la vulnerabilità del complesso, ossia la propensione della struttura a subire un certo livello di danno a seguito di un evento di data intensità, dal punto di vista sia statico che sismico.

Seppure non vi sia una datazione certa, il complesso fu certamente costruito in diverse fasi. Nella prima, in epoca romana, l’edificio aveva funzione pubblica e rientrava in un programma di riorganizzazione urbanistica della città (II sec. d.C. – III sec. d.C.). Costruito con grandi blocchi di travertino, con dimensione maggiore anche superiore al metro, in questa prima fase doveva presentarsi con un’aula centrale coperta da una volta a botte di dimensioni notevoli (circa 19 m di luce) impostata lungo i lati orientale ed occidentale su una successione di tre volte a botte minori (9 m di luce ciascuna).

L’azione ripetuta di eventi sismici ha causato spostamenti, rotazioni, lesioni e crolli sia dei blocchi di travertino che di intere porzioni strutturali. Oggi, buona parte dell’abside si presenta in crollo, così come il nartece e le angolate nordest, sudest e sudovest. In crollo, durante gli scavi, sono emerse inoltre le evidenze delle strutture voltate a copertura dell’aula centrale. Ciononostante si conservano in elevato considerevoli parti.

Il sito di Hierapolis si sviluppa su un complesso sistema di faglie, con evidenti fessurazioni superficiali presenti anche in corrispondenza delle “Terme-Chiesa”. Per comprendere le interazioni suolo - struttura avvenute nel passato e che causarono buona parte dei crolli, nonché per poter valutare l’attuale vulnerabilità rispetto a possibili futuri eventi sismici, è stata condotta un’estesa campagna di indagini in sito di prospezioni sismiche e geofisiche finalizzate a caratterizzare il suolo. I risultati delle prospezioni geofisiche sono stati correlati alle configurazioni danneggiate delle strutture rimaste in elevato, per identificare porzioni strutturali interrata e riconoscere strutture geologiche riconducibili all’attività sismica della zona. Durante la stessa campagna di prove in sito è stato eseguito un rilievo critico finalizzato alla valutazione dello stato di conservazione del complesso e all’identificazione dei meccanismi di danno riconoscibili da ispezioni visive, utilizzando come base le restituzioni architettoniche del rilievo tramite laser scanner. Tramite l’utilizzo di un video-endoscopio a sonda è stato possibile identificare la geometria e la morfologia degli elementi impiegati così come la presenza di leganti e valutare estensione e gravità del quadro fessurativo presente.

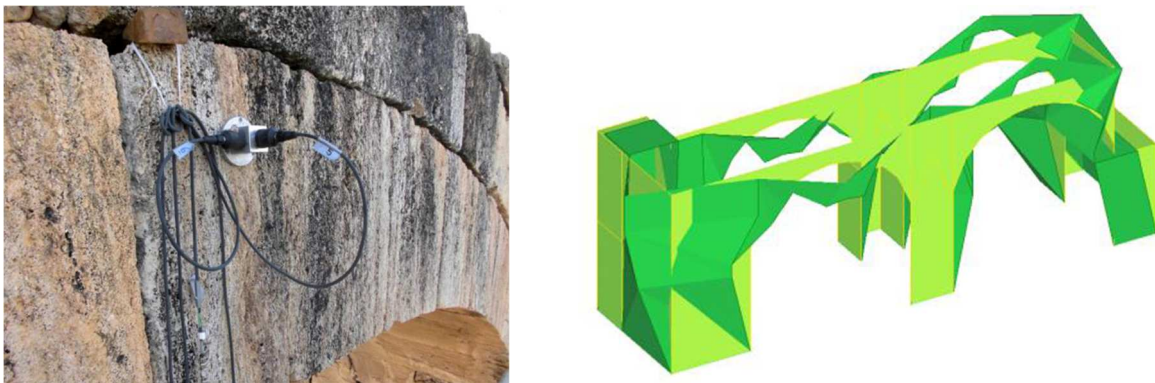


Figura 16 – Installazione degli accelerometri per l’esecuzione delle prove di identificazione dinamica per l’estrazione dei parametri modali della struttura

A completamento delle informazioni necessarie per la modellazione analitica e numerica, nonché per comprendere lo stato di conservazione effettivo ed il comportamento globale dell’ala ovest, sono state eseguite prove di identificazione dinamica sperimentale.

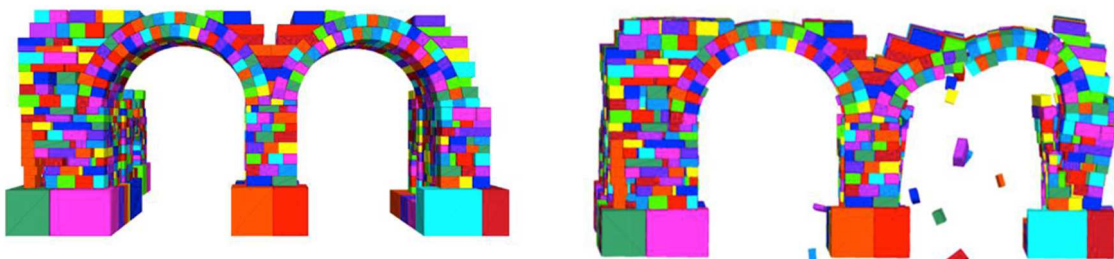


Figura 17 – Modellazione agli elementi distinti (DEM) dell’ala Ovest delle “Terme-Chiesa”: valutazione della vulnerabilità sismica e dei meccanismi di collasso grazie alle analisi dinamiche non lineari

Grazie ai risultati derivanti dalle prove di identificazione dinamica, è stato possibile calibrare e validare modelli sia analitici che numerici. L’identificazione dei modi di vibrare principali della struttura è stata indispensabile per procedere alla valutazione della vulnerabilità sismica tramite l’approccio dell’analisi limite dell’equilibrio con metodo cinematico, previsto dalle norme tecniche sia italiane che internazionali. Inoltre, l’identificazione del comportamento dinamico rappresenta la base per l’applicazione del metodo ad elementi distinti (Distinct Element Method, DEM) con esecuzione di analisi dinamiche non lineari. Sono stati in particolare realizzati due modelli numerici DEM che ricostruiscono, blocco per blocco e con ridotte approssimazioni, la geometria complessiva rispettivamente dell’ala est



e dell'ala ovest delle "Terme-Chiesa". Sono state inoltre modellate le interfacce tra i blocchi considerando, ove presente, anche l'esistenza di malte. Su entrambi i modelli sono state eseguite analisi dinamiche non lineari, identificando i meccanismi di danno e dissesto che potrebbero attivarsi o verificarsi in caso di un nuovo evento sismico di data intensità. Sono stati pertanto simulati gli scenari di danno ottenuti variando i livelli di accelerazione al suolo.

I risultati ottenuti dal DEM sono stati correlati a quelli del FEM e dell'analisi cinematica, individuando le vulnerabilità del complesso al fine di progettare gli interventi idonei alla sua conservazione

## 6. CASTEL SAN PIETRO - VERONA

### 6.1 Analisi globale dell'edificio

Posizionato sulla cima del colle omonimo che sovrasta la città di Verona, Castel San Pietro, costituisce un elemento simbolo della città. Il castello, eretto come caserma austriaca di difesa della città nel 1852, si erige sui resti di un precedente castello di Re Teodorico risalente al 1393. L'attuale edificio ha una pianta a sviluppo rettangolare con tre torri nelle posizioni Est, Ovest e Nord, ha un'altezza al piano delle torri è di 15 m, una lunghezza di 85 m e una profondità di 22 m. Oltre alla forma allungata ed alla presenza delle torri, una irregolarità strutturale è data dalla presenza, solo sull'ala Est di un piano terreno aggiuntivo.



Figura 18 Vista del quadro fessurativo del prospetto Nord del castello

La prima fase di verifica sismica dell'edificio è partita da una profonda indagine conoscitiva del castello con un'accurata fase di rilievo geometrico e del quadro fessurativo e successivamente con una caratterizzazione dei materiali e dei dettagli costruttivi attraverso il loro prelievo e l'esecuzione di 18 prove di martinetto piatto e di video-endoscopie che hanno permesso di valutare la composizione nello spessore dei muri. Un'ulteriore fase ha riguardato l'esecuzione di prove di identificazione dinamica utili alla calibrazione dei modelli di calcolo dinamici.

Nel caso di edifici esistenti, sono disponibili diverse metodologie di calcolo che presentano diversi approcci che nel caso dei più sofisticati risultano particolarmente sensibili alle ipotesi ed alle assunzioni fissate a priori. Per tale ragione è importante ed opportuno confrontare tra loro i risultati dei diversi tipi di analisi per poter raggiungere una migliore accuratezza sul comportamento della struttura. Nella fattispecie si implementata in prima battuta l'analisi cinematica lineare e non lineare [3] (Figura 19-c) con il calcolo dei diversi meccanismi possibili. Successivamente si è operato un confronto a livello globale tra analisi spettrale e non lineare statica. L'analisi dinamica spettrale si è basata sulla calibrazione effettuata a seguito della prova di identificazione dinamica. Un ulteriore confronto è stato fatto nell'analisi non lineare statica tra un modello FEM ed un modello a telaio equivalente.

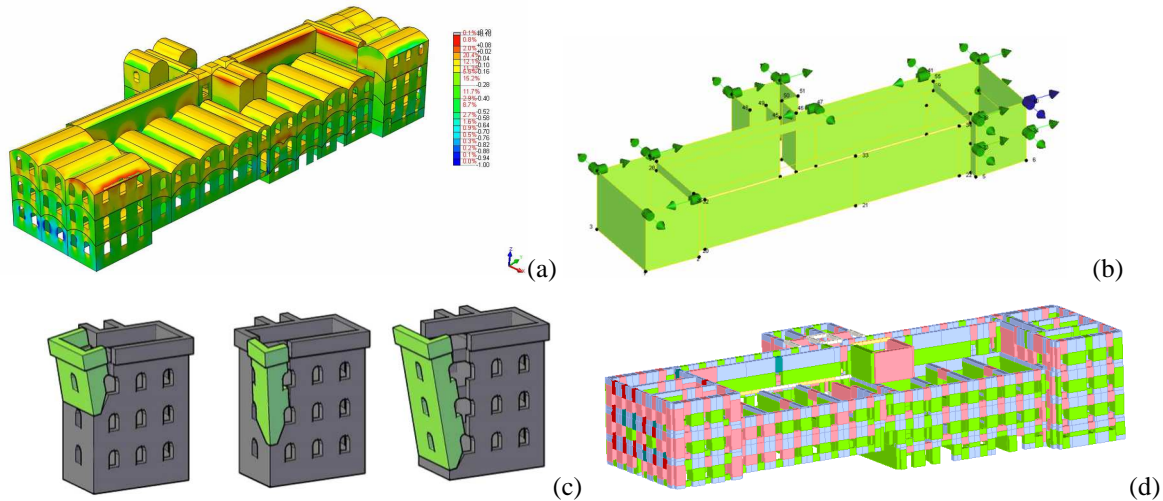


Figura 19 Modello FEM calibrato per analisi dinamica lineare e lineare statica (a) modello per l'identificazione dinamica (b), analisi limite (c), analisi a telaio equivalente (d)

## 6.2 Analisi locale sugli elementi voltati

Una delle peculiarità del castello riguarda gli orizzontamenti, completamente composti da strutture voltate. Per tale motivo la ricerca si è concentrata anche sullo studio degli elementi voltati mediante la progettazione di una prova distruttiva sulle volte atte a caratterizzare i diversi tipi di intervento possibile e ai modelli di calcolo utilizzati. A causa dell'installazione di alcuni vani scala per motivi di accessibilità è stato possibile testare 5 porzioni di volta con luce di 5.6 m ed un'altezza in chiave di 1.1 m. Le volte presentano uno spessore di tre teste (42 cm) nei due quarti laterali e di due teste (28 cm) nella metà centrale. Oltre al campione non rinforzato si è testata una tecnica di rinforzo tradizionale come l'inserimento dei frenelli e tre tecniche con rinforzi estradossali in fibra secondo la tecnica *External Bonded Reinforcement* [8]. In Figura 20 si evidenzia il metodo di prova auto-contrastato sulla struttura del castello con l'applicazione di una forza ciclica applicata al quarto della volta.

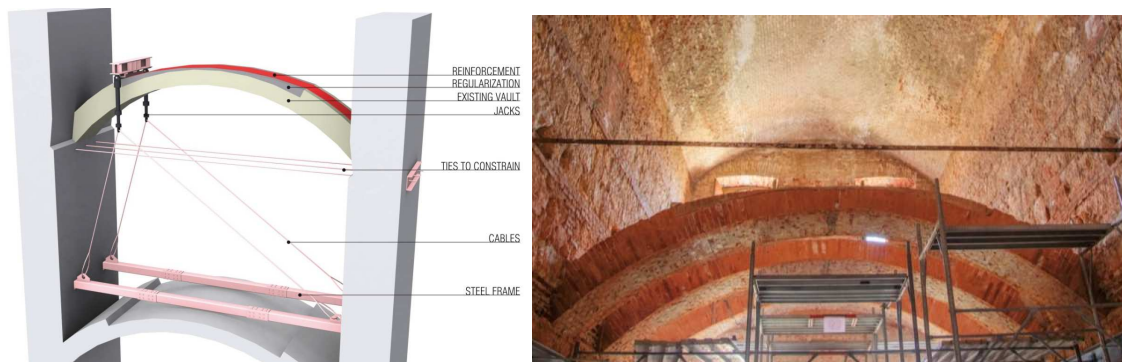


Figura 20 Set-up e metodo di prova (sx) e vista delle volte isolate (dx)

L'indagine sperimentale ha previsto la caratterizzazione dei materiali mediante prove in laboratorio sui componenti originali sia sui componenti del rinforzo. Inoltre, per la calibrazione dei modelli si sono eseguite delle prove di identificazione dinamica.

Lo studio è stato condotto mediante delle analisi cinematiche limite e delle analisi non lineari attraverso la calibrazione dei parametri e confronto con le curve sperimentali ottenute. Lo studio ha permesso di valutare una buona accuratezza dell'analisi limite nella stima dei carichi massimi ottenuti e della posizione delle cerniere. L'analisi non lineare ha mostrato un alto grado di precisione nella descrizione dei fenomeni in atto, delle esatte posizioni del danneggiamento e degli spostamenti. La risposta in



resistenza in termini assoluti mostra però una discreta sensibilità ai numerosi parametri non lineari del materiale. Per tale motivo si conferma la necessità di comparare più metodi di analisi tra loro. Da un punto di vista delle tecniche di rinforzo il metodo con fibre estradossali ha dimostrato significativi incrementi di resistenza e spostamento inibendo la formazione delle cerniere come nel caso non rinforzato.

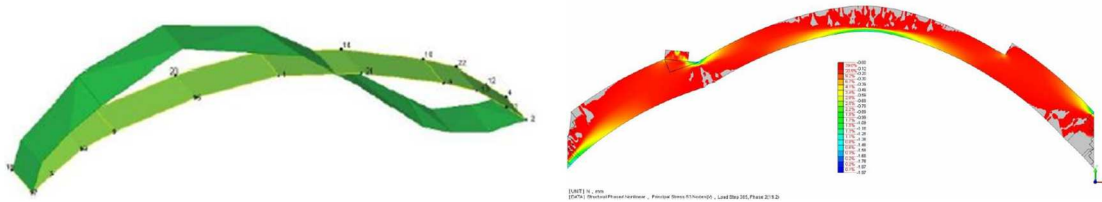


Figura 21 Prima forma modale risultate dell'identificazione dinamica (sx) e risultati dell'analisi non lineare (dx)

## 7. CHIESA DI SANTA MARIA DEL PIANTO - PADOVA

Il caso studio relativo alla chiesa di Santa Maria del Pianto (Figura 22), ubicata nel centro della città di Padova esemplifica bene la possibilità in alcuni casi di approcciarsi alle strutture esistenti esclusivamente mediante l'applicazione dell'analisi limite per macroelementi. In casi in cui il comportamento scatolare, e le usuali considerazioni fatte dai modelli di calcolo globali, non siano rappresentative della effettiva conformazione e concezione strutturale la struttura viene analizzata considerando la sicurezza delle singole parti e lo studio degli interventi mira a ridurre le eventuali vulnerabilità emerse dai singoli meccanismi attraverso un trattenimento degli stessi.



Figura 22 Vista esterna laterale (sx) e facciata (dx) della chiesa di santa Maria del Pianto (Padova) [9]

Similarmente ai casi precedenti, anche per la chiesa di Santa Maria del Pianto, una delle fasi più importanti ha riguardato la conoscenza accurata della struttura, e in particolare della sua conformazione strutturale, partendo dall'analisi storica e successivamente all'analisi dei singoli elementi strutturali e del loro mutuo collegamento. La ricostruzione tridimensionale della struttura in tutti i suoi elementi e lo studio del quadro fessurativo (Figura 23) ha permesso di evidenziare quali erano i meccanismi in atto evidenziandone le criticità locali che sono state risolte mediante alcuni interventi locali che hanno così permesso un significativo incremento della sicurezza della struttura.

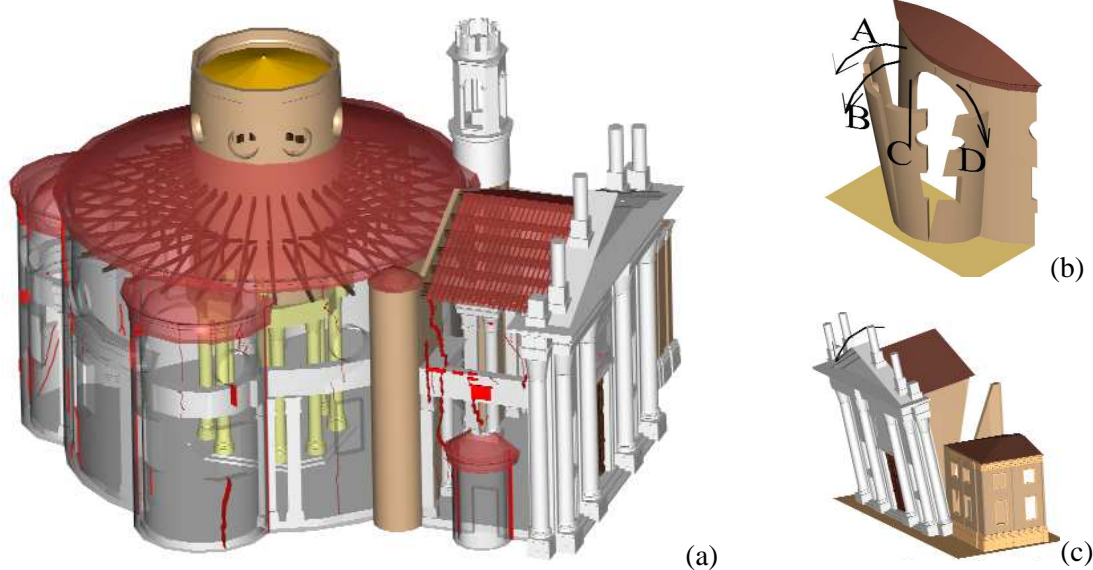


Figura 23 Quadro fessurativo e riconoscimento dei macroelementi tridimensionale (a) e analisi cinematica delle cappelle laterali (b) e della facciata (c)

Dall'analisi di vulnerabilità è emersa per esempio una criticità locale nei confronti del ribaltamento della facciata che ha portato alla progettazione di un intervento di trattenimento della stessa mediante la copertura e che ne ha permesso un significativo incremento del livello di sicurezza anche a livello complessivo.

## 8. REFERENCES

- [1] ISO 13822 (2001) Bases for design of structures-Assessment of existing structures – ANNEX I (Informative) Historic structures;
- [2] ISO CD 13822 –ANNEX I (Informative) Historic Structures;
- [3] G. Gaudini, C. Modena, F. Casarin, C. Bettio, F. Lucchin (2008). Monitoring and strengthening interventions on the stone tomb of Cansignorio della Scala, Verona, Italy. In proceedings of the 6th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions - SAHC, Bath, United Kingdom, 02-04 July 2008.
- [4] L. Binda, C. Modena, F. Casarin, F. Lorenzoni, L. Cantini, L. Munda (2010). Emergency actions and investigations on cultural heritage after the L'Aquila earthquake: the case of the Spanish Fortress. Bulletin of Earthquake Engineering, vol. 9; p. 105-138, ISSN: 1570-761x, DOI: 10.1007/s10518-010-9217-3.
- [5] Lorenzoni F. (2013) Integrated Methodologies Based on Structural Health Monitoring for the Protection of Cultural Heritage Buildings. PhD thesis, University of Trento.
- [6] Lorenzoni F., Casarin F., Modena C., Caldon M., Islami K., da Porto F. (2013) Structural health monitoring of the Roman Arena of Verona, Italy. Journal of Civil Structural Health Monitoring Volume 3(Issue 4):p 227-246. DOI: 10.1007/s13349-013-0065-0
- [7] Cescatti E. (2016) Combined experimental and numerical Approaches to the Assessment of historical Masonry Structures. PhD thesis, University of Trento.
- [8] Cescatti E., da Porto F., Modena C. (2017) In-Situ Destructive Testing of Ancient Strengthened Masonry Vaults. International Journal of Architectural Heritage Volume 12-3:350-361. DOI:10.1080/15583058.2017.1323243.
- [9] Modena C., Valluzzi M.R., da Porto F., Casarin F. (2009) Recent advances in the structural analysis and intervention criteria for historic stone masonry constructions subjected to seismic actions. ISCARSAH Symposium "Assessment and strengthening of historical stone masonry constructions subjected to seismic action" Mostar, Bosnia and Herzegovina.