

La Conoscenza del Comportamento Sismico del Patrimonio Monumentale Italiano attraverso NDT

Dario Foppoli
posta@foppolimoretta.it
Foppoli Moretta e Associati, Tirano (SO) – Italy

Abstract

All'eccezionale rilevanza dell'edificato storico italiano si accompagna un'altrettanto eccezionale fragilità causata dalla sensibilità sismica del territorio nazionale. Questa considerazione è stata evidenziata in modo particolare dagli eventi sismici occorsi negli ultimi vent'anni (dal terremoto dell'Umbria del 1997 a quello di Amatrice del 2016) che non sono stati di elevata intensità, ma hanno causato danni ingenti ai centri storici ed al patrimonio monumentale. Inoltre la prassi consolidata del restauro, operazione nel cui contesto va inquadrato il miglioramento del comportamento sismico di edifici monumentali, si basa sull'assunto che le operazioni di consolidamento strutturale di un edificio esistente debbano avvenire nel rispetto della consistenza materica e della concezione strutturale originaria del manufatto.

E' necessario quindi sviluppare quello che dalla normativa italiana viene definito "il percorso della conoscenza" al fine di riuscire a raccogliere tutte le informazioni storiche, geometriche, materiche e meccaniche che consentono di definire in modo corretto il comportamento strutturale di un edificio. In particolare risulta fondamentale la conoscenza dei dettagli costruttivi, delle caratteristiche dei materiali e del loro livello di degrado, che in gran parte consegue dall'esecuzione di NDT. E' anche fondamentale tener conto dell'importanza artistica rivestita dagli edifici monumentali e perciò è necessario che le tecniche di esecuzione delle prove vengano valutate attentamente con riguardo all'aspetto della conservazione, soprattutto per circoscrivere rimaneggiamenti anche lievi che possono riguardare le superfici storiche.

Nella presente memoria si fa il punto dell'esperienza italiana presentando alcuni casi emblematici riferiti ad importanti monumenti (tra i quali il campanile di Giotto a Firenze, il ponte di Palladio a Bassano e il palazzo di Montecitorio a Roma) che esemplificano le problematiche strutturali che si presentano più frequentemente nel settore, mostrando come un corretto approccio attraverso NDT possa fornire soluzioni appropriate ai quesiti posti.

Key words

heritage, mechanical characterization, deterioration, seismic assessment

1 Introduzione

Il patrimonio monumentale italiano riveste un eccezionale valore e nel contempo soffre per la sua eccezionale fragilità. Il suo valore non richiede ulteriori commenti essendo universalmente riconosciuto e risiede principalmente in una coesistenza unica di monumenti e di paesaggio culturale che hanno mantenuto un' elevatissima unitarietà nel corso di più epoche storiche che vanno dall'età preromana al medioevo, al rinascimento all'età moderna e contemporanea. La fragilità è dovuta a due aspetti complementari. Da un lato l'eccezionalità di detto patrimonio può essere attribuita, oltre che ai celebri monumenti, anche ad un tessuto distribuito costituito da piccoli edifici sparsi nelle città e sul territorio e da centri d'arte di grande valore paesaggistico; tale patrimonio deve il suo valore e nel contempo la sua fragilità proprio all'eccezionale diffusione in quanto richiede interventi di manutenzione diffusa e capillare che sono molto difficili da coordinare e da sostenere.

Dall'altro lato occorre sottolineare la fragilità del territorio che è soggetto molto spesso ad eventi devastanti quali frane ed alluvioni che per altro dipendono, in un circolo vizioso, sia dalle caratteristiche intrinseche del territorio stesso che dalla difficoltà ad effettuarne la manutenzione diffusa. Un altro evento non prevedibile è sicuramente il sisma che, seppure con intensità non elevatissima, ha flagellato in questi ultimi anni il territorio italiano (Fig. 1).

La sequenza è impressionante (il successivo elenco non è completo e riporta l'indicazione della magnitudine locale espressa in riferimento alla scala Richter¹): Messina (1908 - 7.1); Friuli (1976 - 6.4); Irpinia (1980 - 6.8); Sicilia Orientale (1990 - 5.6); Umbria (1997 - 5.9); Molise (2002 - 5.8); Salò (2004 - 5.2); L'Aquila (2009 - 6.3); Emilia (2012 - 6.1); Amatrice/Norcia (2016 - 6.0/6.5).

Pur non avendo in genere un'intensità elevata questi eventi sismici hanno avuto tuttavia un impatto tale da causare danni ingentissimi che, soprattutto dal punto di vista storico, sono risultati irreparabili in quanto la ricostruzione di un edificio monumentale comporta comunque la perdita del suo valore culturale.

Il problema della valutazione della sicurezza delle costruzioni esistenti si può quindi ritenere di fondamentale importanza, sia per l'elevata vulnerabilità di gran parte del patrimonio edilizio soprattutto nei confronti dell'azione sismica, sia per il valore storico-architettonico-artistico dello stesso.

1.1 Il percorso della conoscenza

L'attuale quadro normativo nazionale nel campo strutturale, costituito dalle norme tecniche del 2008 [9], che attualmente sono in corso di revisione, e dal decreto riguardante il rischio sismico del patrimonio culturale del 2011 [10], traccia un percorso chiaro e bene individuato per affrontare la valutazione della sicurezza strutturale in campo sismico, che può utilmente essere applicato anche per effettuare le valutazioni strutturali in campo statico.

La valutazione della sicurezza e delle prestazioni di un edificio richiede che la sua complessità strutturale venga ridotta ad un modello in qualche modo rappresentabile dal punto di vista numerico [1]. Sebbene le analisi sperimentali e numeriche costituiscano un potente strumento per confortare l'osservazione empirica rendendola più oggettiva, è tuttavia opinione condivisa il fatto che su edifici esistenti gli attuali strumenti di analisi, anche i più avanzati, risultino spesso inadeguati a spiegare la stabilità di complesse strutture che pure l'hanno dimostrata nel tempo. Occorre perciò porre particolare attenzione alla necessità di comprendere il comportamento della fabbrica confrontandolo con quanto riscontrato in sito ed alla necessità di essere sempre in grado di fornire una giustificazione intuitiva dei risultati ottenuti dalla modellazione numerica, che altrimenti potrebbero essere il mero risultato di calcolazioni analitiche non adeguatamente rappresentative del reale comportamento fisico dell'edificio.

Per raggiungere un appropriato livello di conoscenza di un manufatto 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;

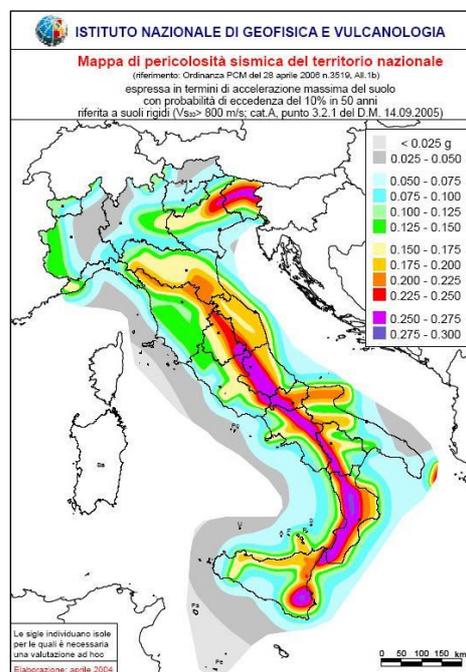


Figura 1 Mappa della pericolosità sismica del territorio nazionale italiano

¹ Dati desunti dal sito INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia): https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/query_eq/

- conseguire un'adeguata conoscenza delle caratteristiche dei materiali e del loro livello di degrado basandosi su documentazione disponibile, su verifiche visive e su indagini sperimentali in situ.

Il già citato decreto del 2011 [10] mette in particolare evidenza il fatto che non sia in qualche caso possibile raggiungere la conoscenza completa di un edificio dal punto di vista strutturale. Per questo traccia un percorso della conoscenza che può essere sviluppato con differenti livelli di approfondimento che dipendono dall'accuratezza con cui è possibile effettuare le analisi preliminari e che risulta articolato secondo le seguenti attività:

- rilievo storico-critico 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.

Il livello di conoscenza (LC) raggiunto in conformità a tale percorso determina poi la scelta dei fattori di confidenza ($1 < FC < 1,35$), che sono fattori riduttivi da applicarsi alle caratteristiche dei materiali in corso della valutazione della sicurezza. Ponendo l'accento sul 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, vengono nel seguito presentati alcuni casi emblematici riferiti ad importanti monumenti che esemplificano le problematiche strutturali che si presentano più frequentemente negli edifici monumentali; essi saranno commentati facendo riferimento ai punti dell'elenco precedente che costituiscono il percorso della conoscenza ora specificato.

2 Case history

2.1 Indagini per la caratterizzazione delle strutture in muratura

Un tipico problema che si pone è quello di individuare l'assetto fondazionale dell'edificio (lettera e). Un esempio significativo a questo proposito riguarda il teatro "La Fenice" di Venezia, costruito alla fine del XVIII sec. e distrutto da un incendio nel 1996 (era già stato precedentemente distrutto da un incendio nel 1836, e poi ricostruito). La campagna di indagine effettuata a seguito di tale evento catastrofico ha avuto l'obiettivo di fornire tutti i dati diagnostici necessari ai tecnici incaricati del successivo progetto di ricostruzione. A questo scopo sono state da noi indagate le murature di fondazione ed in elevazione attraverso carotaggi, di grande (80 mm) e piccolo (20 mm) diametro, ed ispezione endoscopica dei fori realizzati.

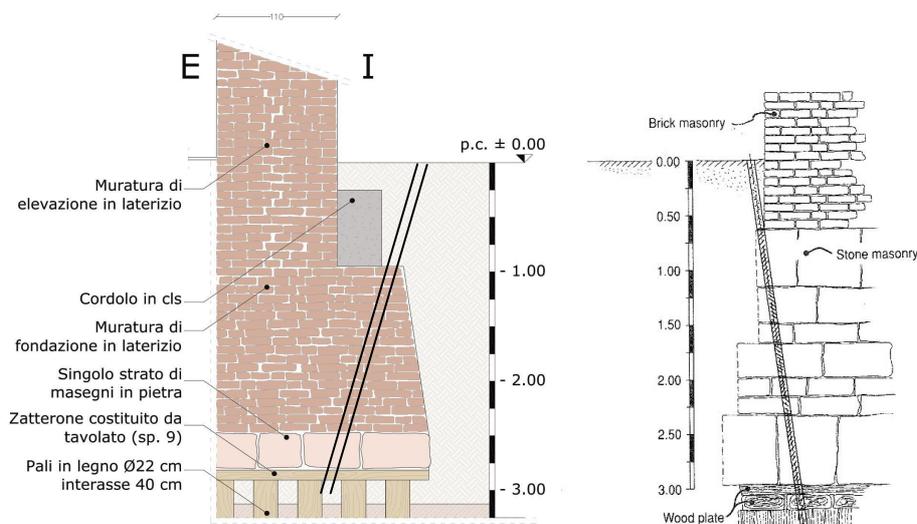


Figura 2 Confronto tra l'assetto fondazionale del teatro "La Fenice" (a sinistra) e quello della Basilica di S. Marco a Venezia (a destra)

E' stata così individuata la stratigrafia delle fondazioni, che risultano impostate a profondità di circa -3 m su pali in legno infissi nel suolo. Sopra i pali è posato un spesso strato di tavoloni in legno, che a Venezia viene chiamato “zatterone”, poi un primo strato di blocchi in pietra, detti “masegni”, e quindi spicca la muratura, in pietra o mattoni (Fig. 2). E' molto significativo il fatto che le fondazioni della Basilica di S.Marco, costruita nel X sec. (ovvero ben 800 anni prima del teatro), siano state realizzate sostanzialmente alla stessa profondità e con la stessa geometria, come pure, sulla base delle informazioni disponibili, la maggior parte delle fondazioni degli edifici veneziani fino all'inizio del XX sec. (tranne quelle del Ponte di Rialto, notoriamente fondato su pali molto profondi). Ciò a riprova del fatto che nell'era pre-industriale le tecniche costruttive erano basate sostanzialmente sull'esperienza e, essendo collaudate nel corso dei secoli dall'uso, avevano una grandissima persistenza nel tempo.

Per quanto riguarda l'individuazione strutturale del manufatto (lettera c) ci si può riferire alle murature in elevazione del *campanile di Giotto* a Firenze. La sua fondazione risale agli ultimi anni del XII sec. A partire dal 1334 la sua realizzazione fu affidata a Giotto da Bondone che lasciò un'impronta indelebile nell'apparato decorativo dei livelli inferiori delle facciate. Tuttavia egli morì 3 anni dopo ed il campanile, dopo un'interruzione ventennale, fu completato nel 1359. In questo caso l'incarico svolto ha riguardato l'analisi delle caratteristiche geometriche e meccaniche delle murature, finalizzata alla verifica della sicurezza strutturale, oltre all'installazione di alcuni strumenti per il monitoraggio statico della struttura.

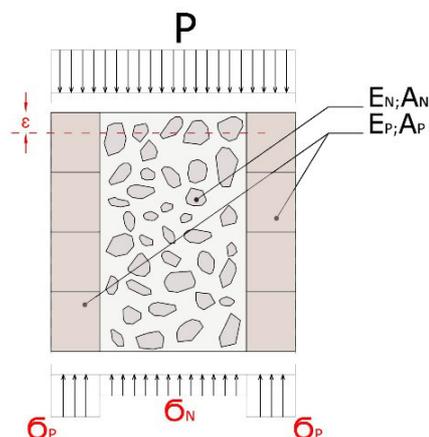
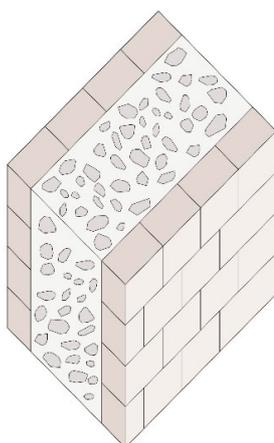


Figura 3 Esecuzione di carotaggi; schema di muratura a nucleo interno e ipotesi di distribuzione delle sollecitazioni nella sezione (isotropa, elastica e lineare)

Le tecniche costruttive di murature in elevazione di grande spessore, come quelle del campanile in oggetto, comportano usualmente la realizzazione, con due paramenti esterni ed un nucleo interno geometricamente e meccanicamente differenziato. In epoca romana il nucleo era solitamente costituito da un conglomerato di ottime caratteristiche meccaniche detto “opus caementicium” ed i paramenti, il più delle volte, da pareti in laterizio di limitato spessore che fungevano da “cassero a perdere” e “finitura”, così il ruolo strutturale era affidato sostanzialmente al nucleo. Nel periodo medievale in cui è stato realizzato il campanile di Giotto invece, a causa della perdita delle competenze tecniche necessarie per la realizzazione del conglomerato, il nucleo interno risultava costituito da inerti aggregati con l'utilizzo di pochissima calce aerea e i paramenti talvolta da muratura in pietra di maggiore spessore (30-40 cm), che in questo caso assurgeva a funzione portante; queste murature sono state spesso impropriamente denominate “a sacco”. Il fattore fondamentale della resistenza di tali murature (che diremo più correttamente “con nucleo interno”) è il rapporto tra gli spessori degli strati ed il rapporto tra le caratteristiche meccaniche degli stessi (Fig. 3). Risulta quindi fondamentale determinare le caratteristiche geometriche attraverso l'esecuzione di carotaggi, ispezioni endoscopiche, indagini elettromagnetiche (radar) ed indagini soniche (eventualmente elaborate con metodi tomografici) e determinare le caratteristiche meccaniche attraverso prove con martinetti piatti e misure soniche. Nel caso del campanile di

Giotto è stato possibile stabilire che il materiale del nucleo interno ha grande spessore ma è anche dotato di significativa consistenza e quindi gioca un ruolo non marginale nel concorrente alla capacità portante complessiva del manufatto, come accade anche nel caso dell'altrettanto famosa torre di Pisa.

Considerazioni del tutto analoghe possono essere desunte dall'analisi del *ponte di Ganda*, una struttura in pietra a tre archi realizzata a Morbegno (SO) lungo il fiume Adda. Questo ponte fu costruito a partire dal 1489 da Johanne Antonio Amadeo, l'ingegnere capo del duca di Milano Lodovico il Moro; più volte danneggiato da battaglie ed alluvioni, nel 1775 fu ricostruito dall'ing. Ferrari con tecnica analoga all'originale. E' interessante il fatto che sia stato possibile reperire presso l'archivio della biblioteca Ambrosiana di Milano i capitolati di progetto relativi a questa ricostruzione; è stato quindi possibile confrontare le prescrizioni costruttive ivi indicate con la situazione che si desume dallo stato di fatto (lettera b) così come individuata sperimentalmente.

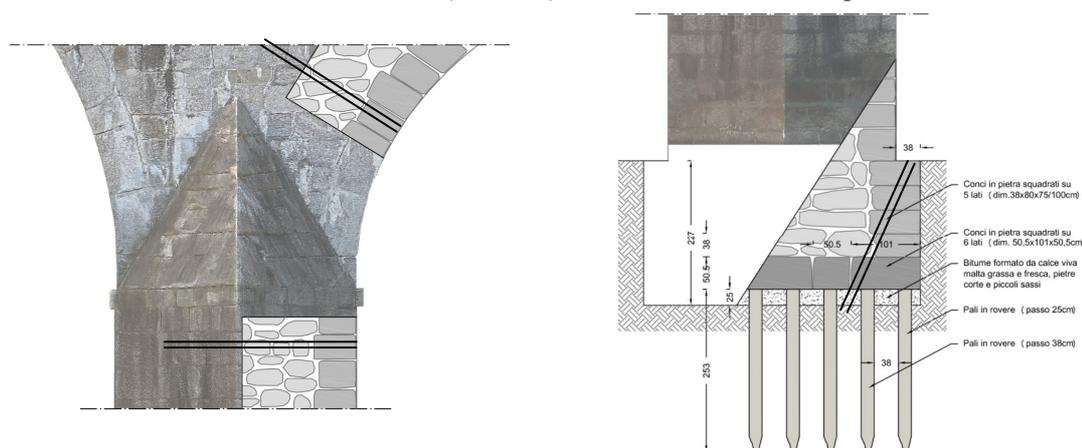


Figura 4 Stratigrafie delle pile e degli archi del ponte di Ganda come desunte dai risultati sperimentali

L'analisi effettuata [7] è stata finalizzata alla valutazione strutturale e della vulnerabilità sismica del manufatto ed ha in questo caso comportato l'esecuzione di tutte le operazioni necessarie al conseguimento di un fattore di confidenza $FC=1,18$ (lettera c-d). Le murature di fondazione ed in elevazione sono così state analizzate mediante l'esecuzione di carotaggi, ispezioni endoscopiche e tomografie ultrasoniche² al fine di definirne le caratteristiche geometriche, che sono poi state confrontate con quelle descritte nei capitolati di costruzione mettendone in evidenza le eventuali difformità. Risulta di estremo interesse osservare come ancora una volta, pur trovandoci in un'area culturalmente e storicamente molto differente da quelle dei due esempi precedente (Milano vs Venezia vs Firenze), le tecniche costruttive sono risultate del tutto simili a quelle già descritte in precedenza (Fig. 4) ed i problemi posti, sia nelle analisi conoscitive che nelle seguenti valutazioni strutturali, siano ancora una volta analoghi.

2.2 Indagini per l'individuazione dei particolari costruttivi

Sempre nell'area alpina un altro ponte di eccezionale rilevanza storica ed architettonica è il *ponte "degli Alpini"* a Bassano del Grappa (VI) lungo il fiume Brenta, una struttura quasi eccezionale nel panorama europeo in quanto realizzata interamente in legno. Le prime notizie riguardanti la sua esistenza risalgono al 1209 ma, ancor più che nell'esempio precedente, trattandosi in questo caso di struttura in legno, il ponte fu più volte distrutto da alluvioni e danneggiato (in questo caso bruciato) dalle guerre, finché nel 1569, dopo l'ennesima distruzione, la ricostruzione fu affidata ad Andrea Palladio; un disegno del ponte è riportato nel suo famoso trattato "I quattro libri di architettura - libro III". La storia successiva è ancora un susseguirsi di distruzioni ed incendi, tanto che nel 1748 fu necessario ricostruire integralmente il ponte sotto la direzione dell'arch. Ferracina; anche in questo caso egli operò in modo del tutto fedele al progetto di Palladio.

L'indagine diagnostica effettuata [4] è stata finalizzata in questo caso alla valutazione delle cause del gravissimo stato di degrado in cui la struttura attualmente versa ed ha comportato il rilievo, il monitoraggio, l'analisi delle spalle in muratura e soprattutto l'analisi delle pile in legno (lettera c), che sarà lo specifico argomento del successivo approfondimento. Sono stati a questo proposito effettuati rilievi della situazione deformativa, ispezioni visive per la classificazione del legname, micro-prelievi di campioni di legno per mezzo di trivella di Pressler ed analisi strumentali mediante resistograph (Fig. 5). Stante la difficoltà di accesso ai punti da analizzare gli operatori hanno dovuto utilizzare tecniche di posizionamento mediante funi, per le quali hanno specificata qualifica. Come esito dell'indagine è stato rilevato un fortissimo degrado della parte bassa delle pile in legno, che pure erano state recentemente restaurate (nel 1990), mettendo tra l'altro in evidenza la scarsa compatibilità tra i materiali originali (legno) ed i materiali utilizzati per il restauro (resine) i quali, ben lungi dal risultare risolutivi, hanno anzi peggiorato i problemi di degrado fino ad arrivare alla situazione limite attuale (40 cm di cedimento differenziale misurati su una pila mediante rilievo laser-scanner e 11 cm di ulteriore cedimento misurati nei 4 mesi successivi nel corso del monitoraggio). Ciò ha suggerito di intervenire immediatamente per mettere in sicurezza la struttura e per predisporre il progetto generale di restauro e consolidamento i cui lavori sono attualmente in corso di realizzazione.

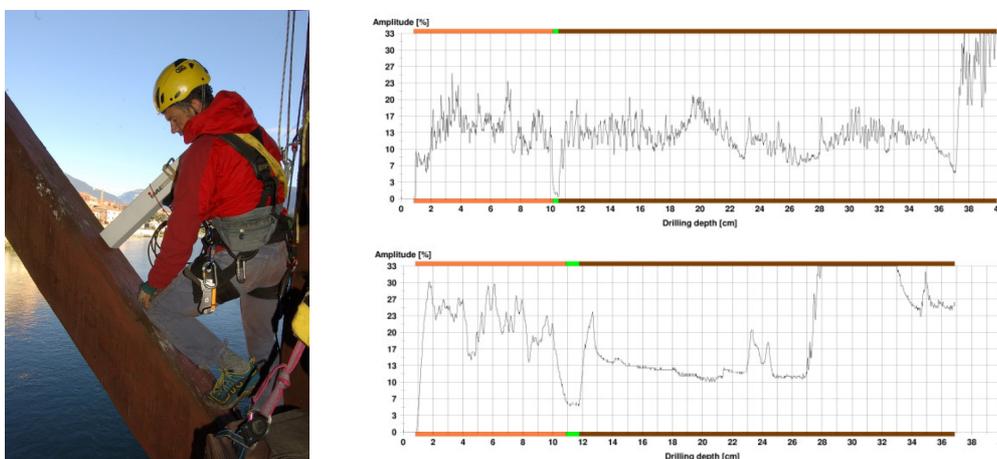


Figura 5 Esecuzione di prove con resistograph; dendrogrammi dei pali in legno del ponte degli Alpini

Nella stessa località (Bassano) è stata effettuata un'altra indagine particolarmente significativa sul *tempio Ossario*, una grande chiesa destinata a raccogliere i resti di 5405 alpini caduti sul vicino fronte del Grappa durante la prima guerra mondiale [2]. L'edificio, costruito nella prima metà del XX sec., è stato realizzato in stile neo-gotico con tecniche peculiari del periodo. L'osservazione approfondita ha evidenziato che nelle parti più direttamente accessibili ed osservabili sono stati utilizzati materiali pregiati, ovvero elementi litici, mentre nelle parti più alte e quindi più difficilmente osservabili sono stati utilizzati elementi seriali o materiali di basso costo quali gesso, stucco, intonaco decorato, con finiture tali da fingere superfici in pietra. Le finiture tuttavia risultano tanto accurate da rendere impossibile ad un'osservazione da distanza la distinzione tra gli elementi in pietra vera e gli elementi in pietra "artificiale".

Nonostante gli ultimi interventi di restauro siano stati completati nel 2011, attualmente lo stato di conservazione delle superfici interne dell'edificio presenta evidenti criticità (problemi di formazione di efflorescenze, distacco di un capitello in gesso ed in qualche caso anche caduta di frammenti dell'apparato decorativo) che hanno richiesto di valutare in modo complessivo lo stato di conservazione delle superfici e degli elementi decorativi (lettera c). E' stata quindi realizzata una campagna diagnostica molto articolata che ha richiesto l'integrazione tra NDT ed SDT al fine di valutare compiutamente le criticità strutturali.

Le analisi degli elementi architettonici e decorativi hanno richiesto l'esecuzione di esami visivi, indagini elettromagnetiche, termografiche, soniche, endoscopiche, stratigrafiche e chimiche. Per quanto riguarda l'aspetto strutturale, per esempio i rilievi termografici hanno consentito di

evidenziare nei due transetti la presenza di elementi lineari ad alta conducibilità termica inglobati nel corpo murario (Fig. 6) che, sulla base dei successivi accertamenti compiuti mediante endoscopia e magnetometria, sono risultati travi in calcestruzzo armato, delle quali è stato poi possibile mediante indagini endoscopiche ed elettromagnetiche rilevare in dettaglio geometria e carpenteria strutturale. Mediante confronto tra le riprese termografiche realizzate nell'aprile 2009 e quelle effettuate nel 2015 è stata inoltre confermata l'efficacia dell'intervento di rifacimento delle coperture del 2011; tuttavia in pochi punti, comunque circoscritti, è stata individuata la residua presenza di umidità, ulteriormente confermata da misure gravimetriche.

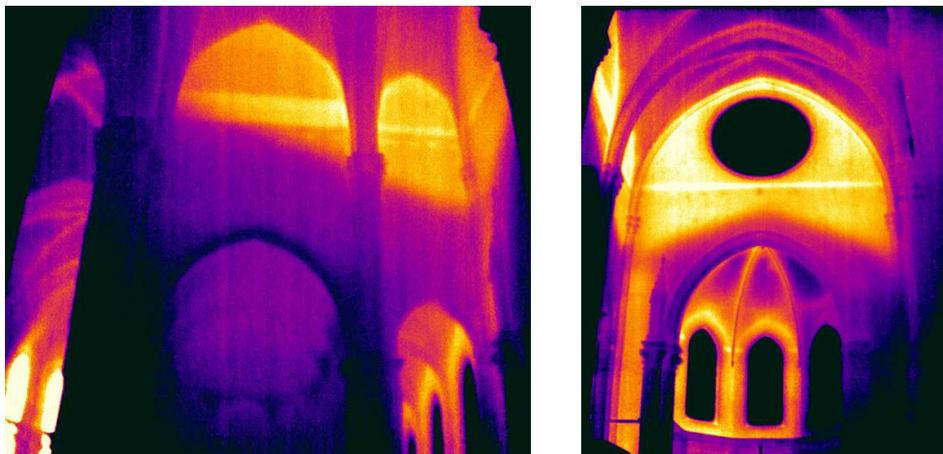


Figura 6 Termogramma del lato sud e del lato ovest del transetto ovest del tempio Ossario

I tre portali della facciata, costituiti da piedritti, pilastrini, pinnacoli e frontoni realizzati in pietra bianca di Pove, presentavano molti elementi già staccati e caduti; in questo caso è stato necessario approfondire in modo particolare l'analisi delle modalità di ammassamento degli stessi alla muratura e delle modalità di connessione reciproca degli elementi lapidei tramite di esami visivi, indagini termografiche, endoscopiche, e chimiche:

A causa dell'interferenza magnetica prodotta dalla presenza di piccole piastre in piombo posate nei giunti orizzontali ed utilizzate come spessori di posizionamento è stato necessario in questo caso escludere l'applicazione di tecniche magnetometriche e procedere mediante indagine effettuata con il radar. Sono inoltre state effettuate misure ultrasoniche sugli elementi in pietra dei pilastrini e dei pinnacoli dei tre portali della facciata principale al fine di valutarne la consistenza e lo stato di conservazione.

2.3 Indagini per la valutazione delle caratteristiche meccaniche di edifici danneggiati dal sisma

Gli scriventi hanno finora operato il rilievo dei danni e l'esecuzione di indagini per la caratterizzazione degli edifici danneggiati dai sismi del Friuli (1976), della Sicilia Orientale (1990), de L'Aquila (2009) dell'Emilia (2012) e dell'Italia Centrale (2016). Hanno analizzato in particolare un gran numero di edifici storici, posti nelle provincie di Modena e di L'Aquila; che sono caratterizzati da differenti tipologie, ma da una significativa uniformità di materiali e di tecniche costruttive. Per questo è stato possibile delineare un approccio complessivo alla diagnostica strutturale, conforme a quanto è stato messo a punto anche in altri casi applicativi [5].

Le indagini sulle murature sono state finalizzate a valutarne la natura e la stratigrafia, oltre a determinarne lo stato di sollecitazione e le caratteristiche meccaniche. Le murature degli edifici dell'Emilia sono in mattoni con tessitura regolare, mentre le murature a L'Aquila sono generalmente realizzate con conci sbizzati in pietra, con paramento di limitato spessore e nucleo interno.

La conformazione delle murature in elevazione è stata analizzata tramite sondaggi meccanici a carotaggio continuo allo scopo di analizzare i materiali costituenti gli elementi strutturali e di determinarne la stratigrafia; le ispezioni endoscopiche hanno reso possibile anche l'individuazione

ed il dimensionamento delle discontinuità e cavità presenti nella struttura muraria. Con un martinetto piatto [11] sono state effettuate misure della tensione di compressione nella muratura e con l'utilizzo di due martinetti piatti paralleli [11] sono state determinate le caratteristiche di deformabilità della muratura stessa. La prova con due martinetti piatti paralleli ha consentito inoltre di stimare la resistenza a compressione della muratura (lettera d).

Il già citato decreto riguardante il rischio sismico del patrimonio culturale del 2011 specifica che i valori dei parametri necessari per le verifiche 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). Se compatibile con le prevalenti istanze conservative, quindi, l'impatto sull'edificio causato dalle tecniche di prova leggermente distruttive può essere accettato, ma deve essere ovviamente contenuto estendendo per quanto possibile i risultati delle indagini dirette con l'utilizzo di tecniche indirette. Nelle campagne effettuate si è operato correlando i risultati attraverso le misure delle velocità di propagazione degli impulsi sonici [13]; alcune delle prove realizzate sono state anche elaborate con metodi tomografici allo scopo di valutare l'omogeneità della sezione (Fig. 7).

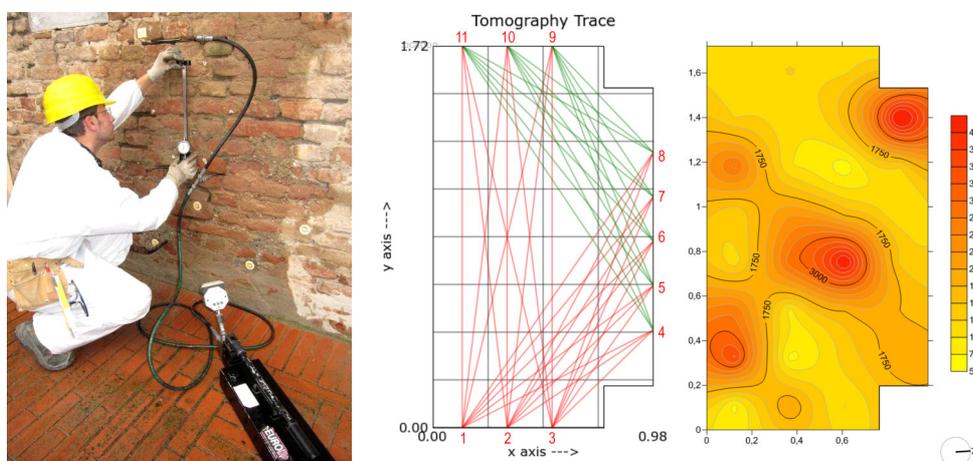


Figura 7 Esecuzione di prova con martinetti piatti, tomografia sonica della sezione orizzontale di un pilastro in muratura

Le numerose prove effettuate in sito nei contesti colpiti dal sisma hanno consentito inoltre di effettuare il confronto comparato dei risultati al fine di pervenire ad una valutazione delle caratteristiche meccaniche che possa essere ragionevolmente estesa alla tipologia delle murature riscontrate nell'area; tali caratteristiche sono poi state confrontate con i dati forniti dalla normativa (Fig. 8)

Le elaborazioni dei dati delle indagini effettuate hanno consentito di trarre alcune conclusioni di sintesi. Appare significativo il confronto tra i dati relativi alle murature in laterizio dell'Emilia e quelli relativi alle murature in pietra de L'Aquila il quale evidenzia come, pur nelle necessarie semplificazioni, la norma italiana colga adeguatamente le caratteristiche meccaniche delle murature in pietra e malta, ma non appaia sufficientemente precisa nel definire le caratteristiche meccaniche delle murature in laterizio. Ciò consegue dal fatto che la norma stessa suddivide le murature in pietra in numerose tipologie in relazione alla loro tessitura muraria, mentre classifica le murature in laterizio in un'unica tipologia presumibilmente in quanto, come peraltro riscontrato in sito, per tale tipologia costruttiva non sono evidenti differenze nella tessitura muraria. Tuttavia si osserva sperimentalmente come le caratteristiche meccaniche delle murature in laterizio risultino, pur con murature ordite "a regola d'arte", fortemente condizionate dalla qualità della malta e dallo spessore dei giunti: tale variabilità dovrebbe essere messa in conto dalla normativa per ottenere una classificazione più conforme alle caratteristiche della muratura.

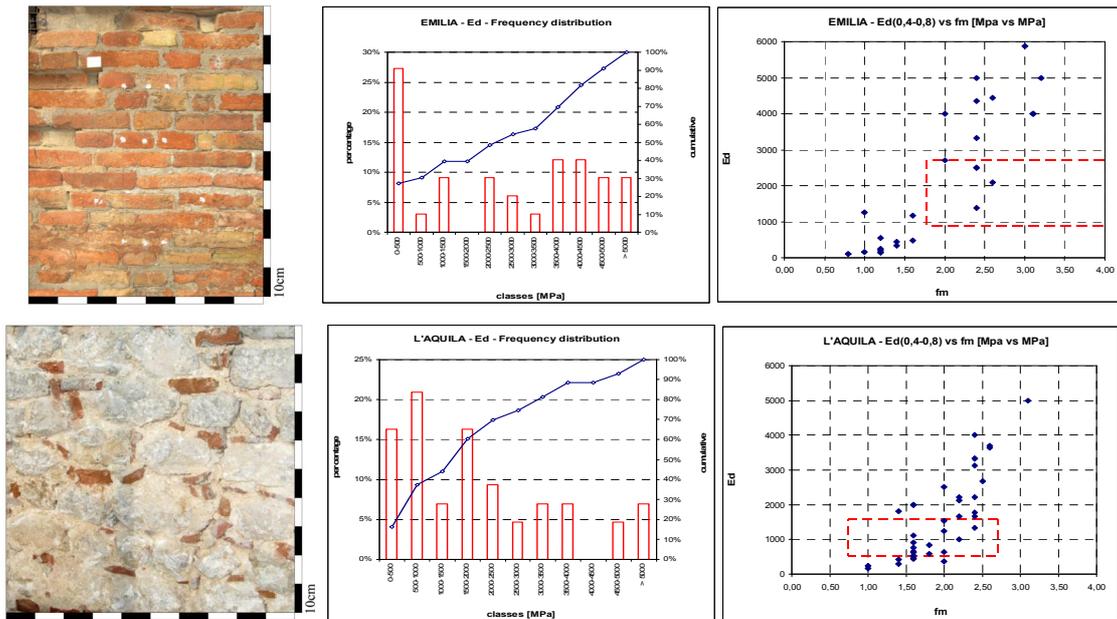


Figure 8 Analisi statistica dei dati: tipologia muraria, curva di distribuzione di frequenza del modulo di deformabilità e diagramma modulo vs. resistenza a compressione confrontato con il range dei valori della norma (rettangolo tratteggiato) in Emilia (sopra) e a L'Aquila (sotto)

Poiché anche il comportamento al taglio delle murature risulta fondamentale agli effetti della valutazione del loro comportamento sismico è stata messa a punto dagli scriventi una nuova tecnica di prova a taglio compressione, anch'essa basata sull'impiego di martinetti piatti, che consente di ridurre di molto l'impatto di tali prove sugli edifici risultando quindi effettivamente applicabile ad un ampio range di manufatti storici.

Tale tecnica, denominata FJ-SCT [6], è stata sperimentata in laboratorio realizzando una serie di muretti in laterizio che per tessitura, composizione e consistenza simulano le caratteristiche delle murature degli edifici storici del nord Italia, riscontrando una buona corrispondenza tra i risultati ottenuti mediante le prove tradizionali e quelli ottenuti applicando tale tecnica. Anche le applicazioni in sito hanno fornito positivi riscontri relativi all'efficienza ed all'efficacia delle procedure messe a punto ed alla precisione dei risultati.



Figure 9 Campione di muratura sottoposto a prove di taglio FJ-SCT con le tipiche fessure diagonali; diagramma tensione-spostamento e relazione di Coulomb

Al fine di determinare la tensione di compressione agente nella muratura viene innanzitutto realizzata una prova con un martinetto piatto; due tagli verticali passanti vengono di seguito realizzati nella muratura e, attraverso un martinetto disposto in verticale, viene applicato al campione sottoposto a prova un carico orizzontale, incrementando la pressione fino a raggiungere

la fessurazione diagonale in almeno uno dei due campioni di muratura al di sopra ed al di sotto del martinetto stesso. Per inciso il fatto che sperimentalmente si siano sempre sviluppate fessure diagonali (Fig. 9) conferma l'efficacia del meccanismo di rottura al taglio instauratosi nella muratura. La prova viene poi protratta fino a provocare uno spostamento orizzontale apprezzabile: tutte le prove effettuate hanno messo in evidenza che con uno spostamento orizzontale di 8-10 mm, quale quello consentito dai tagli previsti, la muratura risulta evidentemente fessurata.

E' così possibile determinare le caratteristiche al taglio della muratura e la sua resistenza, che può essere correlata alla sollecitazione verticale attraverso la formula di Coulomb. I dati sperimentali presentano in molti casi valori di taglio molto maggiori di quelli desumibili dalla normativa, circostanza che è peraltro rilevabile anche dall'analisi dei dati di letteratura; pare quindi ragionevole supporre che i dati proposti dalla normativa risultino cautelativi nella valutazione della resistenza al taglio delle tipologie murarie riscontrabili in sito.

2.4 Indagini effettuate nel corso di interventi di restauro

Gli ultimi esempi proposti riguardano l'esecuzione di indagini e monitoraggi nel corso di interventi di restauro, operazioni che risultano essenziali in quanto il momento del restauro consente di acquisire molte informazioni non altrimenti disponibili. Inoltre negli ultimi tempi la crescente disponibilità di nuovi materiali porta sovente alla previsione progettuale ed all'applicazione di tecniche di intervento poco sperimentate che richiedono accurate operazioni di controllo, specialmente per quanto riguarda la compatibilità con l'esistente dei materiali che si prevede di utilizzare, l'operatività delle tecniche applicative e gli esiti stessi degli interventi. E' importante, in questi casi, affiancare alle operazioni in cantiere un'accurata attività sperimentale che ovviamente deve essere opportunamente calibrata in relazione alla sensibilità del sito ed all'importanza dell'intervento.



Figura 10 Strumentazione per il monitoraggio del palazzo di Montecitorio a Roma

Per quanto riguarda il monitoraggio (lettera a) un riferimento significativo è l'intervento effettuato sul *palazzo di Montecitorio* a Roma, attuale sede della Camera dei Deputati, che è stato realizzato da Gian Lorenzo Bernini a partire dal 1653 come residenza per la nobile famiglia Ludovisi. I lavori furono completati circa 20 anni dopo, quando il palazzo fu destinato agli uffici pubblici della Curia pontificia ed il Dazio. Dopo l'unità d'Italia ed il trasferimento della capitale a Roma nel 1871 il palazzo fu scelto, preferendolo a Palazzo Venezia ed al Campidoglio, per ospitare la sede del parlamento della Repubblica italiana e venne adattato a questo scopo realizzando un'aula semicircolare a gradinate nel cortile interno. La conformazione attuale del palazzo risale al 1918, quando il fabbricato fu profondamente modificato mantenendo la parte frontale dell'edificio berniniano e demolendo l'ala posteriore per costruire un nuovo corpo di fabbrica sul retro, all'interno del quale fu realizzata l'attuale aula del parlamento.

Nel 2005 si mise mano ai lavori di restauro del grande fregio dipinto di Aristide Sartorio, che decora la parte superiore dell'aula, composto da 50 grandi tele realizzate con la tecnica dell'encausto. Rimuovendo tali tele furono messe in evidenza le murature retrostanti che presentavano un esteso reticolo fessurativo. L'incarico svolto ha previsto il monitoraggio delle fessurazioni finalizzato a valutarne la variazione nel tempo (Fig. 10). Dopo un anno di acquisizione

dei dati è stato possibile procedere alla loro analisi statistica, effettuata sulla base dell'analisi in frequenza del segnale, del riconoscimento delle periodicità fondamentali e della loro eliminazione attraverso l'applicazione di un filtro. In questo modo il segnale viene ridotto ad un "rumore bianco" che non presenta alcuna stagionalità e che può quindi essere analizzato mediante una regressione lineare ai minimi quadrati determinandone il trend. Nel caso in oggetto tale analisi ha portato ad escludere la pericolosità delle fessure rilevate che risultano prevalentemente di natura termica e quindi ha consentito di evitare un gravoso intervento di consolidamento strutturale.

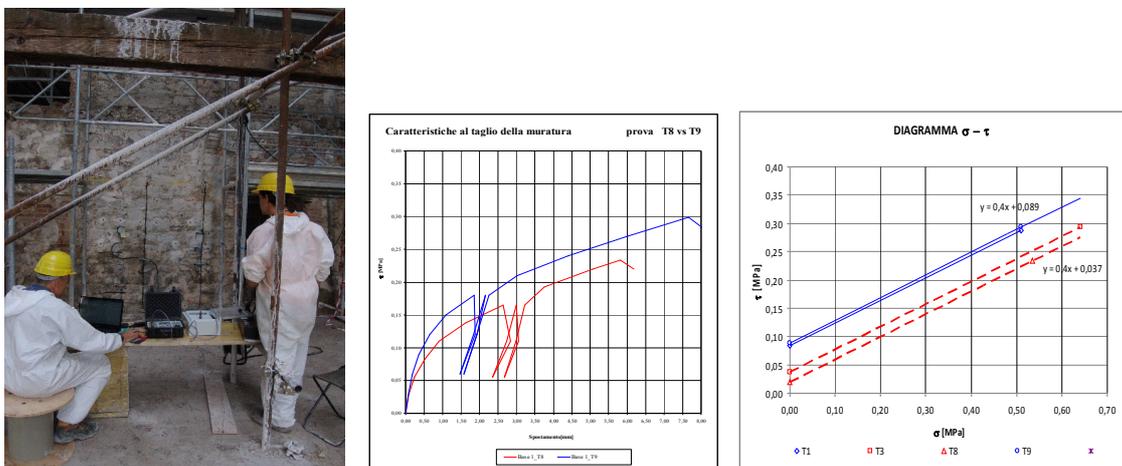


Figura 11 Esecuzione di prova FJ-SCT e confronto tra i diagrammi delle caratteristiche al taglio delle murature consolidate (blu) e non consolidate (rosso)

Tornando infine al contesto sismico il *castello di Colloredo*, costruito dall'omonima famiglia a partire da un decreto di concessione rilasciato dal Patriarca di Aquileia nel 1302, al termine della sua storia secolare è stato quasi completamente distrutto nel 1976 dal sisma del Friuli. Attualmente ne sono finalmente in corso i lavori di ristrutturazione (ultima tra le opere previste per la ricostruzione, ad oltre 30 anni dal sisma).

Su questo edificio si poneva il problema di caratterizzare le murature (lettera d), realizzate con tessitura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno e soprattutto di valutare preliminarmente l'efficacia degli interventi di consolidamento previsti in progetto. Sono stati quindi realizzati i rinforzi con le tecniche previste e sono state effettuate prove di caratterizzazione delle murature mediante martinetti piatti e FJ-SCT, prima e dopo il consolidamento al fine di valutarne l'efficacia; i diagrammi delle caratteristiche delle murature prima e dopo gli interventi sono riportati in Fig. 11.

4. Conclusioni

Gli esempi riportati hanno presentato alcune problematiche ricorrenti per la caratterizzazione strutturale degli edifici monumentali e hanno mostrato i risultati che è possibile ottenere attraverso NDT. Questo risulta fondamentale per conseguire un elevato livello di conoscenza nel percorso che la normativa traccia al fine di definire l'approfondimento diagnostico con cui sono stati raccolti i dati per la valutazione del comportamento sismico di edifici monumentali e conseguire così un ridotto fattore di conoscenza che esprime l'affidabilità dei risultati.



Figura 12 A. Baschenis, S. Cristoforo (1495), Chiesa di S. Agata, Comezzadura (TN)

Quando si affrontano interventi su edifici tanto celebri e vetusti quali quelli appartenenti al patrimonio culturale e monumentale italiano è forte la coscienza di confrontarci con i grandi maestri del passato: ciò deve necessariamente generare un forte senso di responsabilità professionale ed ancor di più personale. Viene da dire, con Bernardo di Chartres [8] "nos esse quasi nanos gigantium humeris insidentes" (Fig. 12)

Ringraziamenti

Le campagne di indagine a cui si fa riferimento nell'articolo sono state realizzate per conto dei seguenti committenti che si ringraziano: *teatro "La Fenice"* a Venezia - p.c. Il Cenacolo (1997); *campanile di Giotto* a Firenze - p.c. Enel Hydro (2006); *ponte di Ganda* - p.c. comune di Morbegno (2016); *ponte "degli Alpini"* - p.c. Comune di Bassano (2014-2015); *tempio Ossario* di Bassano - p.c. Presidenza del Consiglio dei Ministri (2016); *indagini in Emilia e all'Aquila* - p.c. committenti vari (2010-2015); *palazzo di Montecitorio* a Roma - p.c. Politecnico di Milano (2006-2007); *castello di Colloredo* - p.c. Castello scarl (2014).

Bibliografia

- 1) 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
- 2) Caligari A., Foppoli D., NDT for the characterization of a monumental building of the first half of the 20th century: the ossuary Temple of Bassano (Italy), Proceedings of 12th International conference on non-destructive investigations and microanalysis for the diagnostics and conservation of cultural and env. heritage (Art'17), Torino, 2017 (in fase di stampa)
- 3) Foppoli D., Rosina E., Realini M., Un approccio diagnostico non distruttivo funzionale alla conservazione programmata – il caso del palazzo Besta di Teglio (SO), Atti del 14° congresso nazionale sulle prove non distruttive monitoraggio diagnostica, Firenze 2011 The e-Journal of Nondestructive Testing
- 4) Foppoli D., From Palladio to Reinforced Concrete – NDT applied to the old and new Bridge of Bassano del Grappa, Proceedings of International Symposium on Non-Destructive Testing in Civile Engineering (NDT-CE 2015), Berlino, 2015, pp. 378-387 The e-Journal of Nondestructive Testing
- 5) Foppoli D., Inspections and NDT for the Characterization of Historical Buildings after Seismic Events: 2012 Emilia Earthquake, Proceedings of 10th International Conference Structural Analysis for Historical Constructions (SAHC 2016), Leuven, 2016, pp. 1497-1504
- 6) Foppoli D., Pulcini A., A New Method to Test Masonry Shear Characteristics Thought Flat Jack (FJ-SCT Method), Proceedings of 19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016), Monaco, 2016
- 7) Foppoli D., The Knowledge of a Three Arched Stone Bridge in the Alpine Region Based on the Comparison between Historical Analysis and Diagnostic Data, Proceedings of International Conference "Bridge: The Heritage of Connecting Places and Cultures", Ironbridge 2017(in fase di stampa)
- 8) Giovanni di Salisbury, Metalogicon (III, 4), 1159