

ANALISI E DOCUMENTAZIONE ARCHEOLOGICA DELL'EDILIZIA STORICA IN AREE A RISCHIO SISMICO: DALL'ATLANTE DEI TIPI COSTRUTTIVI MURARI ALL'IMPIEGO DELLE MODERNE TECNOLOGIE DI RILIEVO

1. INTRODUZIONE

Gli ultimi eventi sismici che hanno riguardato la nostra Penisola, localizzati nel Centro e nel Nord, hanno messo in luce la fragilità del nostro patrimonio edilizio e quanto una piena consapevolezza delle sue vulnerabilità debba essere attentamente valutata in senso qualitativo e quantitativo. In tale prospettiva, negli ultimi anni in Italia si stanno sviluppando progetti in aree a medio-alto rischio sismico che prevedono analisi dell'edilizia storica effettuate da team composti da geologi, architetti, ingegneri, sismologi e archeologi, strutturati in funzione di una prima valutazione e analisi dello stato di conservazione e delle vulnerabilità dei complessi architettonici. La grande novità di queste esperienze è la centralità della figura professionale dell'archeologo che assume un ruolo di primo piano nella compagine del gruppo di lavoro come parte attiva nei processi di analisi e documentazione, producendo dati indispensabili allo sviluppo del processo conoscitivo e alla conseguente valutazione del rischio a cui sono sottoposti i manufatti. Una moltitudine di dati che si legano da un lato alle proprietà intrinseche della fabbrica degli edifici, mediante l'integrazione tra storia costruttiva e meccanica; dall'altro lato, attraverso l'integrazione di più casi studio, i dati elaborati permettono una visione inedita della sismicità storica di un territorio, aggiungendo informazioni a quelle già in possesso e talvolta producendo scenari inediti per alcuni periodi storici di riferimento (ARRIGHETTI 2015).

In questo processo entrano in gioco tecnologie, tecniche, metodi e strumenti che non restano più ad esclusivo servizio del singolo professionista, ma diventano una base sulla quale ogni membro di un progetto viene chiamato a riflettere. Dunque un processo di analisi progressivo, che spesso richiede di tornare sui propri passi, ma che impone la capacità collettiva di confronto e di discussione, in un'ottica globale e territoriale. Questa impostazione viene applicata anche nelle fasi di documentazione delle tecniche costruttive, dove l'apporto interdisciplinare nell'analisi dei manufatti permette una registrazione dei campioni che assume importanza sia sotto l'aspetto della comprensione delle caratteristiche materiche, costruttive e meccaniche delle murature, ma anche per quanto concerne il profilo storico-archeologico. Una documentazione che permette dunque di proporre un approccio evolutivo ai caratteri delle murature, connesso ad una loro analisi crono-tipologica in chiave territoriale,

che da un lato permette di connettere specifici sistemi costruttivi a periodi storici di riferimento, ma dall'altro offre l'opportunità di confrontare tali cambiamenti ai contesti sociali, politici ed economici in cui questi avvengono.

Questo approccio, se utilizzato in aree a rischio sismico, impone riflessioni importanti sull'evoluzione delle tecniche in funzione delle caratteristiche delle committenze e delle maestranze, legando spesso l'utilizzo di specifici materiali e scelte tecnico-operative alle esigenze imposte dalle dinamiche di emergenza o alle fasi di ricostruzione (ARRIGHETTI 2016). In quest'ultimo caso spesso si assiste alla volontà di sperimentare empiricamente nuove soluzioni, varianti più o meno complesse delle tecniche tradizionali, di derivazione autoctona o alloctona, che portano alla strutturazione di culture costruttive tese a contrastare o mitigare gli effetti di nuovi eventi sismici che permangono invariate in specifiche aree per un breve o lungo periodo, talvolta perdendo la funzione per cui erano state pensate (ARRIGHETTI *et al.* 2019).

2. L'ATLANTE DEI TIPI COSTRUTTIVI MURARI

In Italia, sebbene il territorio sia caratterizzato da un'intensa attività sismica, il settore sismologico non ha mai avuto un ruolo preponderante negli studi archeologici ad ampio raggio sull'edilizia storica. La prima sperimentazione in tal senso sembra essere l'Atlante dei Tipi Costruttivi Murari d'Italia, uno strumento nato per la catalogazione delle tecniche costruttive in aree a rischio sismico che mosse i suoi primi passi in riferimento al terremoto del Friuli del maggio-settembre 1976. Dopo tale evento, nel 1985 si costituì il Comitato Nazionale per la Prevenzione del Patrimonio Culturale dal Rischio Sismico con il quale il Ministero per i Beni e le Attività Culturali (Ufficio Centrale per i Beni Ambientali, Architettonici, Archeologici, Artistici e Storici) cercò di dare una uniformità al panorama nazionale della tutela e del restauro architettonico, elaborando un programma basato su due linee di attività: da una parte la ricerca e la sperimentazione e dall'altra gli aspetti normativi e metodologici.

Tale Comitato, a sua volta, si espresse dando vita ad una serie di interventi a carattere istituzionale, sotto forma di "Raccomandazioni" (nel 1986 elaborò le Raccomandazioni relative agli interventi sul patrimonio monumentale a tipologia specialistica), di "Programmi" (all'interno del I Seminario Nazionale di Studio, svoltosi a Venezia nel 1987, dette avvio all'attività del Programma Quadro delle Ricerche) e di "Direttive" (nel 1989 elaborò le Direttive per la redazione ed esecuzione di progetti di restauro comprendente interventi di miglioramento antisismico e manutenzione nei complessi architettonici di valore storico artistico in zona sismica).

Questi furono i presupposti con i quali venne affrontato il II Seminario Nazionale, svoltosi a Roma nell'aprile del 1997, dove venne redatto

un bilancio delle ricerche fino a quel momento effettuate. Nell'incontro, per la prima volta, i risultati delle indagini svolte in questo campo vennero presentati alla comunità scientifica, ponendo le questioni della ricerca su di un nuovo piano di valutazione. Fra i risultati attesi, sicuramente rivestivano notevole importanza quelli delle Università italiane, con le quali per la prima volta il Ministero affrontò «in maniera organica un rapporto di mutua collaborazione di natura interdisciplinare, con studi finalizzati alla tutela del patrimonio culturale su un tema specifico di grande significato sociale e tecnico-culturale» (BALLARDINI 1998, 75). In tal senso, tre Università italiane (Genova, Siena e Salerno) nel 1985 vennero incaricate di elaborare un Atlante dei Tipi Costruttivi Murari, ovvero uno strumento che, tramite l'utilizzo di apposite schede, permettesse la registrazione e la catalogazione delle tecniche costruttive caratterizzanti l'edilizia storica delle province italiane in funzione della prevenzione del patrimonio culturale dal rischio sismico.

Lo studio investì tutto il territorio nazionale portando alla produzione di tre atlanti presentati al Seminario di Roma del 1997: uno per l'Italia settentrionale (coordinato dal prof. Tiziano Mannoni, MANNONI, CICIRELLO 1998), uno per l'Italia centrale (coordinato dal prof. Roberto Parenti e ad oggi rimasto inedito) ed uno per l'Italia meridionale (coordinato dal prof. Paolo Peduto e dalla prof.ssa Tiziana Saccone, PEDUTO, SACCONI 1998). Lo studio sistematico di ognuna delle tre macro-aree geografiche in questione si sviluppò suddividendo il territorio in sub-regioni. In particolare vennero individuate: 22 aree per l'Italia settentrionale, 20 aree per quella centrale e 3 macro-aree per quella meridionale, quest'ultima a sua volta suddivisa in 18 sub-aree dove la sismicità storica era stata maggiore del VII grado della scala MCS (Mercalli - Cancani - Sieberg). Tale suddivisione venne effettuata da un lato per agevolare e snellire il lavoro e dall'altro per distinguere all'interno di uno stesso territorio amministrativo, ad esempio all'interno della stessa regione, le zone che presentavano caratteristiche omogenee dal punto di vista geologico e costruttivo.

Dal punto di vista tecnico, gli atlanti erano composti da schede appositamente redatte per l'analisi architettonica di strutture murarie geograficamente e cronologicamente eterogenee, al fine di comprenderne il loro comportamento sotto sollecitazione sismica. Tale apparato grafico conteneva da 79 a 85 campi informativi, la metà dei quali campi di definizione, riguardanti la localizzazione, la funzione e la datazione dell'opera muraria, osservazioni varie e codici informatici. L'altra metà dei campi erano analitici, contenevano cioè le caratteristiche dei materiali (litici, laterizi e leganti), le tecniche costruttive e gli eventuali degradi strutturali. Le aree sottoposte ad analisi, per agevolare il lavoro, venivano a loro volta suddivise in sub-aree, solitamente definite dalle province o dalle città di grandi dimensioni presenti al loro interno. In tali sub-aree fu operata un'ulteriore scelta interna tesa ad individuare quali edifici erano funzionalmente variabili e corrispondenti alle seguenti categorie:

- strutture abitative,
- impianti produttivi (mulini, fonti, cisterne),
- edifici ecclesiastici (pievi, cattedrali, chiese),
- edilizia pubblica civile (palazzi, torri),
- strutture difensive (cinte murarie, porte, fortezze).

Il campione preso in esame fu a sua volta ridimensionato in base alla rappresentabilità dei campioni costruttivi e alla difficoltà di trovare cronologie assolute, privilegiando così le zone abitative, i castelli e i monasteri, rispetto agli edifici isolati e dispersi nel territorio. Per ogni area fu dunque prodotta una vasta documentazione rappresentata da:

- un *corpus* di schede dove sono stati registrati gli studi effettuati sulle strutture,
- un allegato dove sono state elencate le strutture indagate e, per ogni edificio, è stata prodotta una breve sintesi discorsiva delle informazioni ricavabili dalla schedatura che lo riguarda,
- un allegato rappresentante la sintesi finale del lavoro, nel quale sono state indicate le notizie di carattere geologico, storico e geografico dell'area indagata, sono state enunciate le metodologie impiegate nello studio dei contesti e infine sono stati presentati i materiali da costruzione individuati e le tecniche costruttive rilevate. A conclusione di questo allegato è stata poi elencata la bibliografia utilizzata durante lo studio.

Le schede di catalogo, nonostante facciano parte di un'unica metodologia di analisi e della medesima azione costruttiva, per far fronte alla richiesta specifica da parte degli ingegneri strutturisti, furono articolate in due diverse tipologie suddivise in base all'elemento architettonico indagato: muratura e angolata (oltre ad una particolare attenzione alle sezioni delle murature).

3. IL PERIODO POST-ATLANTE E IL PROGETTO ARCHEOSISMOLOGICO PER LA TOSCANA

Purtroppo alla realizzazione dell'Atlante non fece seguito un nuovo impulso verso l'applicazione dei metodi archeologici di analisi e di documentazione delle architetture di aree a rischio sismico a scala territoriale. Solo in tempi recenti, in particolar modo dopo le attività sismiche che hanno coinvolto il territorio aquilano nel 2009 e quello emiliano nel 2012, gli archeologi hanno nuovamente riflettuto in modo concreto sul piano metodologico, sulle possibilità offerte dalla disciplina in riferimento alla conoscenza e alla prevenzione dell'edilizia storica dagli effetti dei sismi (per citare solo alcuni fra i lavori: BROGIOLO, FACCIO 2010; BROGIOLO, CAGNANO 2012; REDI *et al.* 2012; ARRIGHETTI 2015). Tali analisi però si sono sviluppate in modo estremamente eterogeneo, spesso caratterizzandosi per una grande quantità di dati elaborati, purtroppo difficilmente sistematizzati in modelli organici di

analisi dei manufatti o del territorio o tesi alla costruzione di vere e proprie prassi operative nello studio archeosismologico dei territori.

Partendo da questi presupposti, dal 2010, in Toscana sono state avviate dallo scrivente, in collaborazione con il Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Firenze¹, una serie di campagne di rilievo e analisi archeosismologica di alcune aree a rischio sismico. In particolare, accanto a progetti pluriennali ormai già conclusi e pubblicati, *in primis* il progetto svolto dal 2010 al 2013 in Mugello (ARRIGHETTI 2015), sono stati avviati una serie di lavori, attualmente in corso di svolgimento, che stanno fornendo risultati molto interessanti dal punto di vista territoriale: sono i casi dell'area del Casentino, in provincia di Arezzo (ARRIGHETTI *et al.* 2022b), e del centro storico della città di Firenze (ARRIGHETTI 2018; ARRIGHETTI, MINUTOLI 2019). In questi contesti, nel corso delle letture stratigrafiche degli edifici, sono stati evidenziati dissesti, danni e restauri relativi a possibili, e talvolta specifici, eventi sismici. L'integrazione fra il dato archeologico, le complesse vicende storiche legate alle società che hanno costruito e abitato il territorio nel corso del tempo e i dati contenuti nei cataloghi sismologici, ha fornito risultati eccellenti a livello storico, sismologico e architettonico.

Fra i territori interessati dalle analisi svolte dal 2010 ad oggi, esiste però un complesso architettonico esemplificativo, la Pieve di Sant'Agata del Mugello, probabilmente il caso di studio più completo e qualitativamente eccellente fra tutti quelli analizzati dall'inizio del progetto, che ha restituito dati eccezionali dal punto di vista storico-architettonico e sismologico, avvalorati e confermati da un sisma che ha interessato la struttura nel 2019. L'edificio, le cui vicende storico-architettoniche sono state recentemente pubblicate (ARRIGHETTI *et al.* 2022a) e non saranno dunque trattate nel presente elaborato, rappresenta un esempio di enorme interesse sia dal punto di vista metodologico che di conoscenza della sismicità storica di una specifica area.

4. LA PIEVE DI SANT'AGATA DEL MUGELLO: IL PROGETTO ACROSS E IL TERREMOTO DEL 2019

La Pieve di Sant'Agata, date le sue caratteristiche architettoniche, le innumerevoli testimonianze storiche e la sua localizzazione in un'area a medio/forte attività sismica, è un caso di studio unico nel suo genere. La chiesa rappresenta infatti un testimone di grande valore storico, culturale e scientifico dell'attività sismica della regione. Attraverso le diverse fasi di trasformazione dell'edificio nel corso della sua storia è possibile risalire alle caratteristiche

¹ I progetti vedono il coordinamento dello scrivente per la parte archeologica, del prof. Giovanni Pancani (DIDA - UNIFI) per la parte di rilievo e del prof. Giovanni Minutoli (DIDA - UNIFI) per la parte di diagnostica strutturale.

del moto sismico del suolo che ha interessato a più riprese (ad es. nel 1542, 1597, 1611, 1919) il comune di Scarperia e San Piero (FI). Conoscere il moto del suolo legato ad un terremoto permette di migliorare la stima della pericolosità sismica e di lavorare alla mitigazione del rischio a cui è esposta la popolazione. La Pieve si presenta come un complesso architettonico pluri-stratificato le cui vicende costruttive si possono far risalire ai secoli centrali del Medioevo con dissesti, danni, restauri e ricostruzioni, queste ultime anche di notevole entità, avvenute a più riprese nel corso della sua storia (ARRIGHETTI *et al.* 2022a). Per questo motivo un gruppo interdisciplinare e internazionale (Italia-Francia) composto dall'Università degli Studi di Siena, dal CNR di Firenze, dall'Università degli Studi di Firenze, dall'École Normale Supérieure de Paris e dall'Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire (Paris), nel biennio 2018-19, ha sviluppato un progetto di ricerca innovativo di analisi dell'edificio denominato AcRoSs-Archeologia, Restauro, Sismologia.

La ricerca, in breve, si è basata sulla realizzazione di un modello digitale della chiesa e degli edifici annessi, mediante l'integrazione dei prodotti derivati dall'utilizzo di moderne tecnologie, la cui progettazione ha integrato le analisi storico-archeologiche, il rilievo tridimensionale della struttura avvenuto con l'ausilio di laser scanner (Fig. 1), fotogrammetria terrestre e da



Fig. 1 – Nuvola di punti del complesso architettonico di Sant'Agata ottenuta dal rilievo laser scanner (rilievo: Marco Repole; coordinamento: Andrea Arrighetti e Giovanni Minutoli).

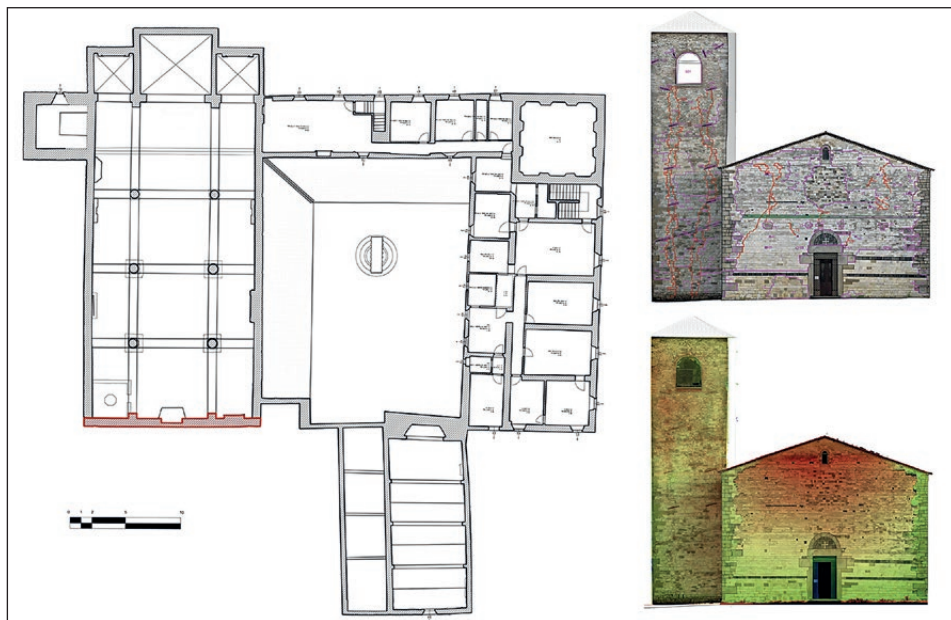


Fig. 2 – Planimetria del complesso architettonico di Sant'Agata con particolare della stratigrafia e degli Elevation Maps del prospetto O esterno della chiesa (rilievo e restituzione: Marco Repole; coordinamento: Andrea Arrighetti e Giovanni Minutoli).

drone, le analisi sui materiali costruttivi con particolare riferimento a malte ed elementi lapidei e laterizi, e una serie di informazioni ottenute attraverso l'auscultazione della risposta dell'edificio al rumore sismico.

L'integrazione di tutti questi dati ha fornito *in primis* un modello altamente dettagliato della morfologia della struttura utilizzabile nella progettazione di futuri interventi di restauro, che ha permesso di evidenziare le patologie attualmente presenti sull'edificio integrate alla sua evoluzione storico-costruttiva (Fig. 2). Inoltre il modello generato dall'elaborazione dei dati acquisiti dalle varie analisi ha permesso di ipotizzare in modo estremamente dettagliato la risposta della chiesa a futuri terremoti. I risultati dell'indagine sono stati presentati per la prima volta al pubblico attraverso una conferenza e una mostra organizzate all'interno della Pieve e nel chiostro nel corso dell'autunno del 2019 e pubblicati all'interno di una rivista internazionale (MONTABERT *et al.* 2020).

Due mesi dopo la conclusione del progetto, il 9 dicembre 2019, si è verificato un sisma nel Mugello che ha interessato, fra le varie zone, anche il comune di Scarperia e San Piero. La Pieve di Sant'Agata, nei giorni seguenti all'evento sismico, dopo una prima analisi sul campo senza l'ausilio di strumentazioni tecnologiche, ha mostrato alcuni dissesti circoscritti collocabili

nella zona absidale, dove è stato evidenziato un allargamento di alcune lesioni, e nella porzione interna della struttura, nella quale è stato attestato il crollo di materiale incoerente di piccole dimensioni dalla parte sommitale delle murature perimetrali. Ad un primo esame, la situazione appariva dunque abbastanza stabile e, ad eccezione dell'abside centrale dove il tamponamento del finestrone mostrava un evidente aggravamento di una deformazione già presente (Fig. 3), la chiesa non presentava nuovi dissesti o cambiamenti significativi. A margine di questa prima analisi è stato dunque strutturato un secondo progetto di rilievo mediante laser scanner teso a confrontare i dati acquisiti mediante le analisi archeosismologiche e diagnostiche della chiesa e del campanile nelle situazioni di pre- e post-sisma. I dati restituiti sono

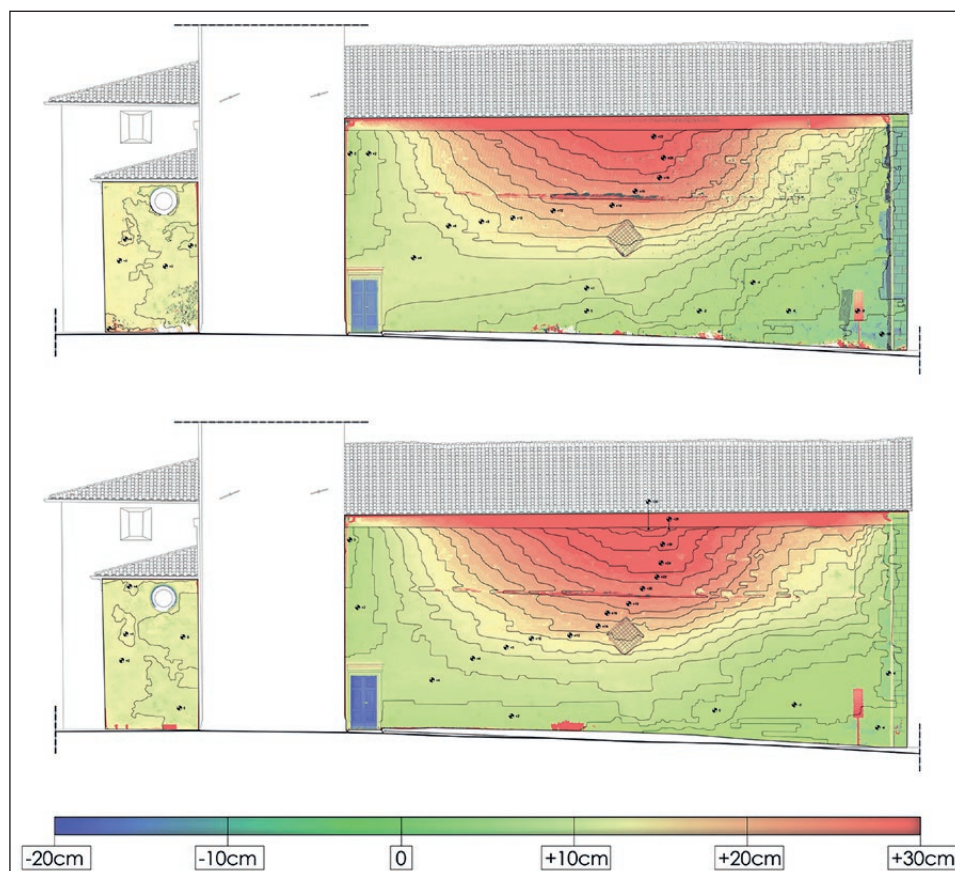


Fig. 3 – La deformazione mostrata dagli Elevation Maps della parete N della chiesa prima (in alto) e dopo (in basso) il terremoto del 2019 (rilievo e restituzione: Marco Repole; coordinamento: Andrea Arrighetti e Giovanni Minutoli).

stati davvero interessanti se rapportati alla storia costruttiva e alle interfacce stratigrafiche presenti sulle murature del manufatto.

Il rilievo è stato condotto con le medesime condizioni di quello precedente, utilizzando la stessa strumentazione, con una prassi operativa che ricalcava quella utilizzata nella fase pre-sisma. La restituzione del rilievo è stata confrontata con quella antecedente, sovrapponendola in ogni sua parte mediante punti topografici di appoggio, e andando a creare piani di sezione ad altezze predefinite nei punti di maggiore interesse (colonne, copertura, murature perimetrali). Inoltre sono stati realizzati nuovi Elevation Maps della struttura (BERTOCCI, BINI 2012; MINUTOLI 2012) che sono stati sovrapposti sia con quelli pregressi (Fig. 3), che con la stratigrafia.

Di seguito vengono presentati, a titolo di esempio per fornire un quadro completo della metodologia adottata, alcuni passaggi effettuati nello studio del manufatto, comparando le situazioni pre- e post-sisma. L'intento dei paragrafi successivi non è quello di mostrare i risultati ottenuti dalle analisi dell'edificio dal punto di vista strutturale e meccanico, cosa che richiederebbe l'intervento di un ingegnere strutturista, ma piuttosto quello di mostrare come, attraverso le moderne tecnologie di rilievo unite alla lettura archeologica delle murature, sia possibile determinare una notevole quantità di dati in senso qualitativo e quantitativo. Queste informazioni risultano elementi di grande interesse sia dal punto di vista storico-archeologico, sia nella progettazione degli interventi sulle strutture.

4.1 *Le colonne*

Sulle colonne è stata svolta un'analisi comparativa tra la situazione pre- e post-sisma del 2019. Per tutti questi elementi è stato condotto uno studio sulla deformazione delle stesse sezionando, dalla nuvola di punti ottenuta mediante rilievo laser scanner, ogni elemento alla base e immediatamente sotto ai capitelli

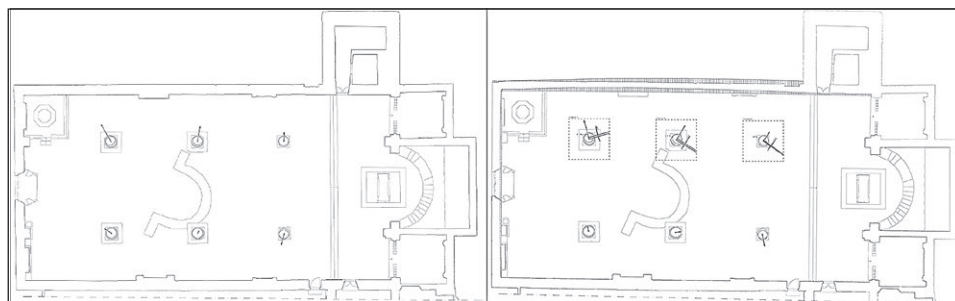


Fig. 4 – Sezione planimetrica della chiesa con sovrapposizione delle colonne a loro volta sezionate all'altezza dei capitelli, utile a mostrare il cambiamento nella direzione dell'inclinazione delle colonne (graficizzato da una freccia) nei periodi pre- (a sinistra) e post- (a destra) sisma del dicembre del 2019 (rilievo e restituzione: Marco Repole; coordinamento: Andrea Arrighetti e Giovanni Minutoli).

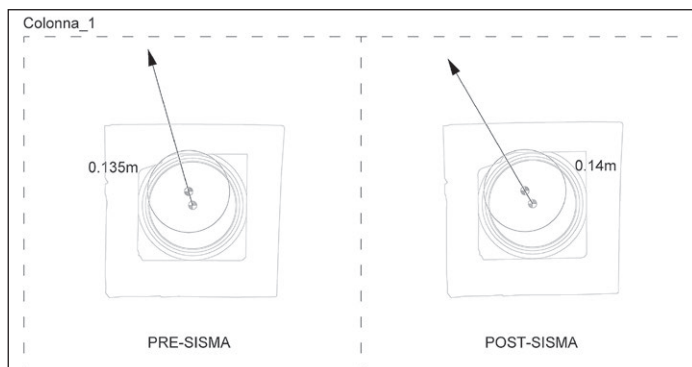


Fig. 5 – Particolare del tipo di analisi svolto su una colonna prima e dopo il sisma del 2019 (rilievo e restituzione: Marco Repole; coordinamento: Andrea Arrighetti e Giovanni Minutoli).

e sovrapponendo i risultati fra le situazioni ante- e post-sisma (Fig. 4). In questo modo è stato possibile comprendere come il terremoto abbia modificato l'inclinazione già presente in questi elementi e, conseguentemente, come il tetto (ancorato alle colonne mediante specifiche cerchiature in ferro inserite nel corso dei restauri del XVI secolo) e le pareti laterali (collegate a sua volta alle travi del tetto mediante catene in ferro) siano ruotati seguendo specifici assi e dinamiche correlati alla morfologia e alle caratteristiche costruttive dell'edificio.

Se rapportiamo questo dato alla stratigrafia del monumento (Figg. 6 e 7) appare ipotizzabile come la deformazione che ha interessato la struttura spingendola verso l'angolo NO (Fig. 4) sia probabilmente correlabile a due fattori: da un lato l'angolo si presenta come l'unico punto libero dei due perimetrali della struttura dove si innesta la copertura, mentre nelle altre porzioni si presentano corpi di fabbrica in appoggio che offrono un sostegno assimilabile a quello di un contrafforte (a S il chiostro, a NE il campanile); dall'altro lato, nella porzione sottostante all'angolo NO, il terreno in cui sono state scavate le fondazioni dell'attuale edificio religioso si presenta incoerente poiché frutto del crollo e dell'interramento della vecchia chiesa di Sant'Agata, visibile in tratteggio leggero nelle Figg. 6 e 7 e scoperta a seguito del rifacimento del pavimento interno della chiesa negli anni '60 del Novecento e sulla quale viene ad impostarsi l'attuale edificio religioso probabilmente nella seconda metà del XII secolo (ARRIGHETTI *et al.* 2022a).

4.2 Le pareti perimetrali esterne e interne

Le analisi delle meccaniche dei dissesti delle murature, da una prima caratterizzazione sovrapposta del quadro deformativo e fessurativo sulla

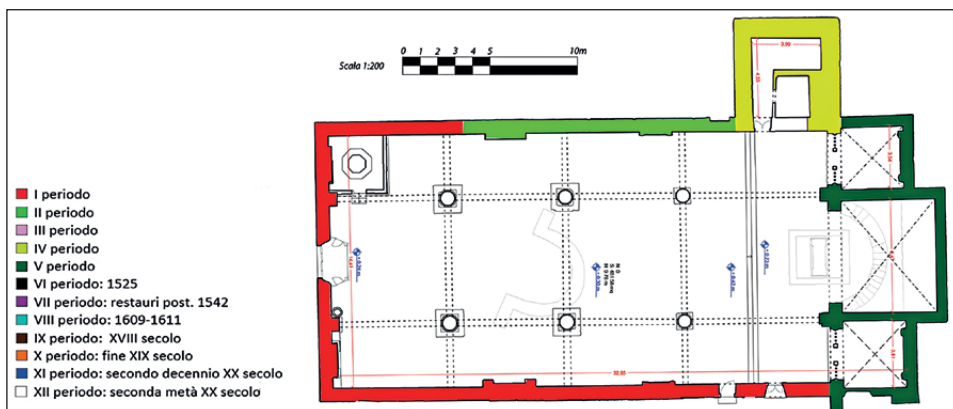


Fig. 6 – Sezione planimetrica della Pieve di Sant'Agata all'altezza di circa 1,5 m da terra (rilievo e restituzione: M. Repole; coordinamento: A. Arrighetti, G. Minutoli).

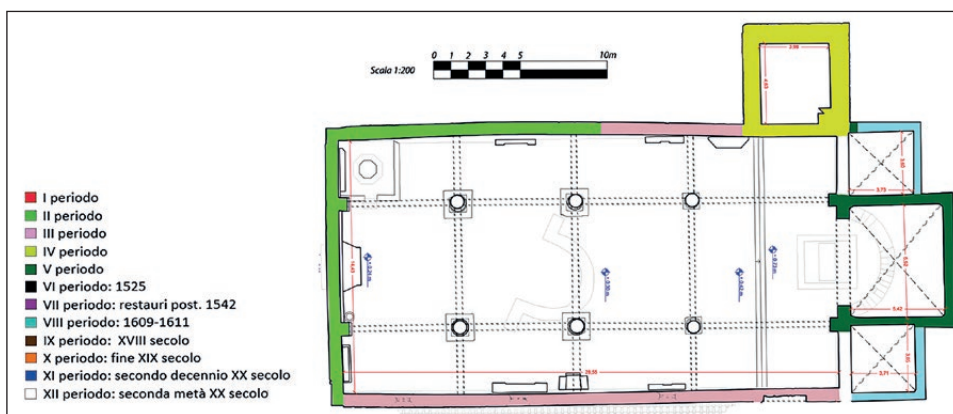


Fig. 7 – Sezione planimetrica della Pieve di Sant'Agata sotto i capitelli delle colonne (rilievo e restituzione: M. Repole; coordinamento: A. Arrighetti, G. Minutoli).

lettura archeologica, mostrano una connessione tra le interfacce stratigrafiche e i punti di rotazione o ribaltamento sia nella situazione pre-sisma, che nei successivi movimenti scaturiti a seguito del terremoto del dicembre 2019. In particolare, le evidenze deformative già messe in luce a seguito dell'analisi pre-sisma, già strettamente correlate alle interfacce stratigrafiche presenti nei prospetti (Fig. 8), hanno visto una netta accentuazione, interessando i medesimi contorni stratigrafici delle diverse Unità Stratigrafiche Murarie (USM, Fig. 9). Se andiamo ad esempio a confrontare il perimetrale S della chiesa (Figg. 8, 9), interessato prima del dicembre 2019 da una deformazione nella



Fig. 8 – Sezione del perimetrale interno S della Pieve di Sant'Agata nella situazione pre-sisma del 2019 con la sovrapposizione tra il quadro deformativo per curve di livello e la stratigrafia (in nero) (rilievo e restituzione: M. Repole; coordinamento: A. Arrighetti, G. Minutoli).



Fig. 9 – Sezione del perimetrale interno S della Pieve di Sant'Agata nella situazione post-sisma del 2019 con la sovrapposizione tra il quadro deformativo per curve di livello e la stratigrafia (in nero) (rilievo e restituzione: M. Repole; coordinamento: A. Arrighetti, G. Minutoli).

porzione alta del prospetto che segue la linea di interfaccia tra la prima fase della chiesa e il suo rialzamento operato probabilmente nel corso del XIII secolo, la situazione post-sisma mostra una accentuazione della deformazione preesistente partendo proprio dalla linea di contatto tra le fasi costruttive precedentemente menzionate. Allo stesso modo prendendo come esempio la facciata (Fig. 10), anch'essa caratterizzata da una deformazione ben evidente nella porzione centrale-alta della parete, all'altezza del tamponamento del vecchio rosone, risulta chiaramente visibile la relazione tra deformazioni e stratigrafia tra prima e seconda fase costruttiva (distinguibile in basso con due linee orizzontali nette presenti a destra e sinistra della porta di accesso),

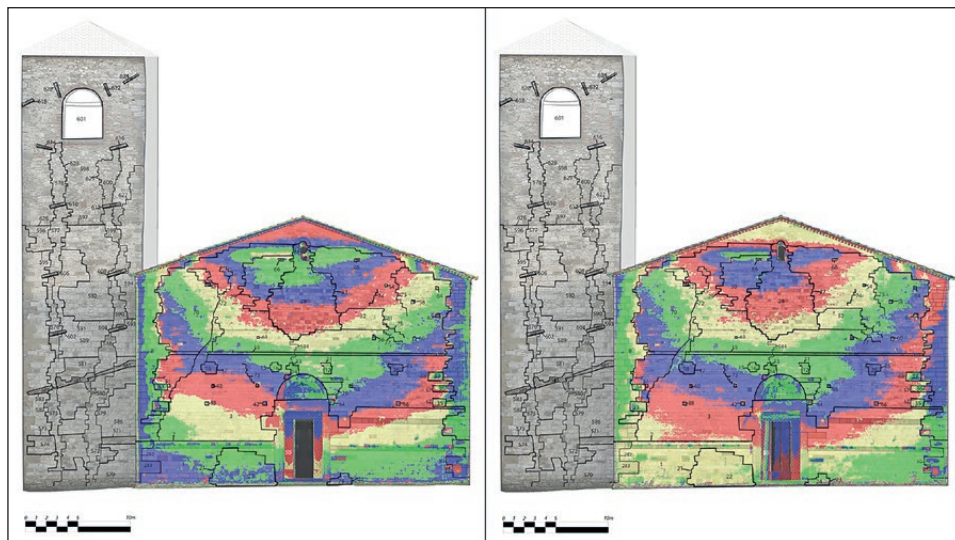


Fig. 10 – Sezione del perimetrale esterno O della Pieve di Sant'Agata nella situazione pre- (a sinistra) e post- (a destra) sisma del 2019, con la sovrapposizione tra il quadro deformativo per curve di livello e la stratigrafia (in nero) (rilievo e restituzione: M. Repole; coordinamento: A. Arrighetti, G. Minutoli).

tra il tamponamento del rosone e la muratura circostante (soprattutto nella porzione bassa) e tra le angolate e la muratura (ricostruite a seguito di un esteso fuori-piombo dei prospetti ad esse collegati).

4.3 *Le tecniche costruttive murarie*

Le tecniche costruttive murarie riscontrabili nella Pieve sono in totale tredici e riguardano i principali periodi costruttivi dell'edificio. Ogni tecnica è stata individuata a seguito della lettura archeologica delle murature, cercando di descrivere al meglio il cambiamento nel know-how delle maestranze presenti nei diversi cantieri costruttivi (Fig. 11). Allo stesso tempo la caratterizzazione delle tecniche ha previsto la documentazione dei danni e dei dissesti visibili sull'edificio e degli interventi messi in opera per riparare o per contrastare tali problematiche. La registrazione delle tecniche, dei danni/dissesti e delle riparazioni è avvenuta mediante un'apposita schedatura (ARRIGHETTI 2019) che ne ha permesso una registrazione puntuale in senso qualitativo e qualitativo, inserendo questi elementi all'interno del processo di indagine stratigrafica dell'edificio. Si è cercato dunque di legare questi interventi al divenire storico-costruttivo del manufatto e di interpretarli nell'ottica di una conoscenza del bene dal punto di vista archeosismologico. Per quest'ultimo punto un passo di fondamentale importanza è stato la possibilità di avere

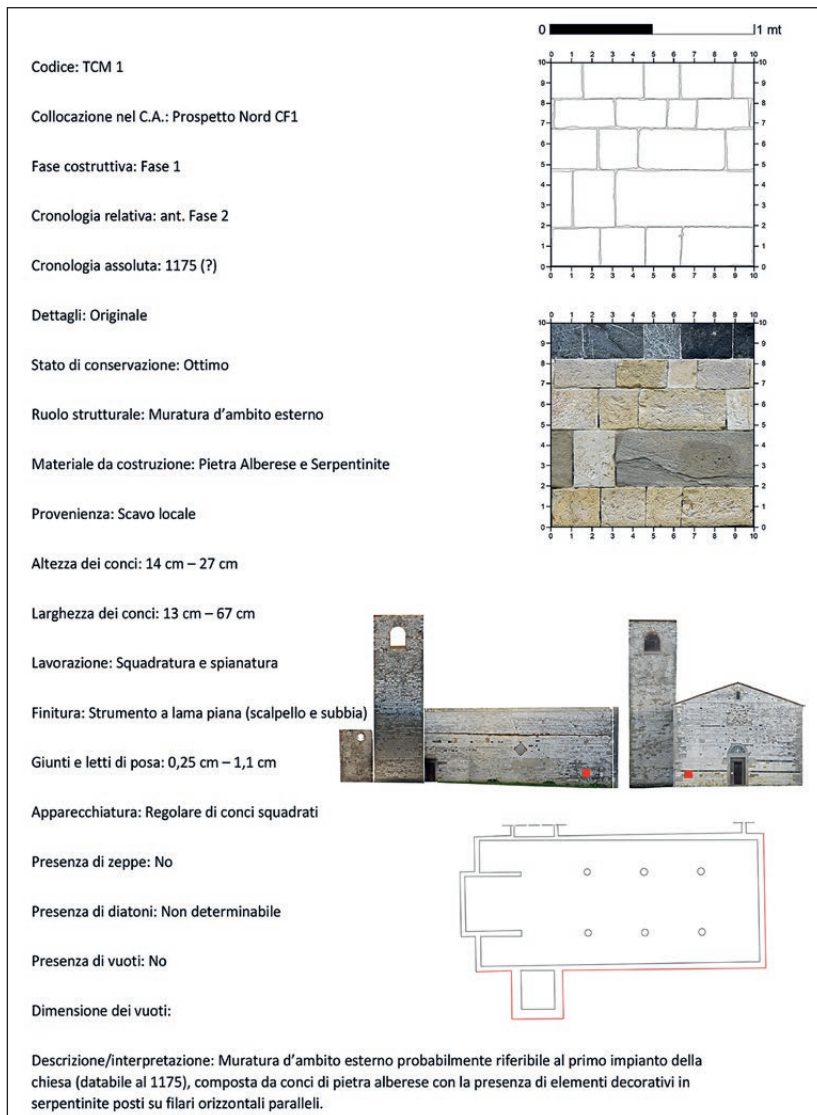


Fig. 11 – La scheda utilizzata per la registrazione delle tecniche costruttive murarie.

fonti scritte, epigrafiche, iconografiche e cartografiche eccezionalmente puntuali e specifiche, che hanno permesso di datare e interpretare con precisione l'origine della maggior parte dei dissesti e degli elementi costruttivi impiegati (ARRIGHETTI *et al.* 2022a).

Le tecniche individuate all'interno dell'indagine sono state infine catalogate all'interno di un database digitale denominato OPUR (Outil Pour Unités de Réparation / Strumento per unità di riparazione), sviluppato all'interno del programma RECAP (Reconstruire après un tremblement de terre. Expériences antiques et innovations à Pompéi / Ricostruzione dopo un terremoto: antiche esperienze e innovazioni a Pompei)² da un team di ricercatori dell'École Normale Supérieure-Université PSL di Parigi³. Il database, inizialmente impostato per la documentazione delle tecniche di riparazione post-sismica individuate nel sito archeologico di Pompei, è stato quindi testato, e attualmente è in fase di aggiornamento, per la registrazione delle evidenze emerse dall'analisi in Mugello con l'indagine della Pieve di Sant'Agata e successivamente con l'ampliamento dello studio a ulteriori strutture a seguito dell'attivazione del nuovo progetto "ACROSS-Archaeology, inventory of Reconstruction, Seismology and Structural engineering"⁴.

5. RISULTATI

Il sisma che il 9 dicembre 2019 ha colpito alcuni comuni del Mugello ha provocato danni a numerose fabbriche religiose e civili, rendendo evidente quanto risulti indispensabile garantire la buona conservazione del patrimonio architettonico con interventi di manutenzione periodici. Allo stesso tempo, i danni causati dal terremoto hanno messo in evidenza quanto sia urgente avviare l'esecuzione degli interventi di miglioramento sismico, unica garanzia di conservazione per edifici che, essendo collocati in un territorio classificato come a pericolosità sismica media, possono essere comunque sottoposti a scosse con importanti effetti sul patrimonio edilizio. Si ricorda, infatti, che nel 2019 ricorreva il centenario del sisma che nel giugno del 1919 ha seminato morte e distruzione in Mugello e che, nonostante l'evidenza storica, buona parte degli edifici interessati dall'ultimo terremoto versava in condizioni piuttosto critiche già prima del 9 dicembre.

Nel dicembre del 2019, all'interno della chiesa e del chiostro della Pieve di Sant'Agata del Mugello si erano appena concluse le giornate di presentazione del progetto "AcRoSS-Archaeologia, Restauro, Sismologia" e l'esposizione

² Progetto ANR-14-CE31-0005, 2015-2019, coordinato dal dipartimento AOROC (UMR 8546, ENS-CNRS-EPHE, Université PSL), associando l'IPGP (Institut de Physique du Globe de Paris, UMR 7154), l'INRIA (Institut national de recherche en informatique et en automatique, Paris-Rocquencourt, UMR 8548) e il Centre Jean Bérard (USR 3133, CNRS-EFR), in collaborazione con il labex TransferS, l'ISTerre (UMR 5275), l'Università degli Studi di Padova, l'Università degli Studi di Napoli Federico II e il Parco archeologico di Pompei: cfr. <http://recap.huma-num.fr>.

³ Il database OPUR è stato creato in Filemaker 13 da Agnès Tricoche, sotto la supervisione di Hélène Dessales, con i contributi di Guilhem Chapelin (CNRS, CJB) e Julien Caverio (ENS, labex TransferS) per la sua progettazione.

⁴ Il nuovo progetto ACROSS, coordinato dalla Dott.ssa Maria Lancieri dell'IRSN, è attualmente in corso di svolgimento in Mugello e prevede l'analisi dal punto di vista interdisciplinare di numerose strutture presenti nel territorio (<https://across-project.github.io/>).

da parte del team italo-francese dei risultati ottenuti dall'analisi dell'edificio. A pochi giorni dallo smontaggio della mostra sulle attività svolte dal progetto è avvenuto un terremoto che, fortunatamente, non ha causati danni di grandi proporzioni. L'evento è stato però "registrato" dalle murature della Pieve, diventando per noi un'occasione unica per verificare direttamente le ipotesi che avevamo proposto in riferimento alla vulnerabilità del complesso, andando dunque a validare o confutare la metodologia di analisi utilizzata, e nel comprendere come la stratigrafia architettonica, a tutti i suoi livelli di approfondimento, ha interagito con il movimento sismico.

L'analisi svolta sulla Pieve di Sant'Agata a seguito del sisma del 2019 è stato dunque un evento di eccezionale interesse dal punto di vista conoscitivo e metodologico. Capita infatti raramente di poter rapportare su di un edificio una situazione pre- e post-terremoto, avendo a disposizione un rilievo molto accurato dal punto di vista morfo-metrico.

Da una prima analisi senza strumentazione svolta sulla chiesa di Sant'Agata è apparso subito chiaro è che a seguito del terremoto del 2019 la chiesa sia stata caratterizzata da un'evidente accentuazione delle deformazioni già presenti (Fig. 3), con particolare incidenza nel prospetto laterale N, nella facciata e nelle colonne, queste ultime soggette ad una progressiva inclinazione verso l'unico spigolo libero da strutture di sostegno, ovvero quello NO. Il lato del chiostro, dove si presentano strutture in appoggio alla chiesa, che durante il sisma hanno rivestito una funzione di contrafforte, il lato absidale, nel quale sono state inserite in emergenza catene metalliche come intervento post-sisma da parte di Vigili del Fuoco, e l'angolo interessato dal campanile costruito in appoggio al perimetrale N non sembravano invece mostrare segni particolari di movimento.

L'impiego delle tecnologie di rilievo ha aiutato in modo sensibile nella documentazione dei reali effetti del terremoto. Mediante l'elaborazione dei dati è stato infatti possibile determinare con estrema accuratezza tutte le dinamiche innescate dal sisma e come queste si siano relazionate ai dissesti già presenti e alle interfacce stratigrafiche di riferimento.

6. CONCLUSIONI

La conoscenza è una fase operativa imprescindibile in un qualsiasi progetto che preveda un intervento diretto sull'edificato storico. Leggere la stratificazione degli eventi naturali e antropici sulle architetture, fornendo una valutazione quanto più attenta possibile della loro complessità storico-costruttiva, è un passo indispensabile verso una piena consapevolezza delle caratteristiche formali e fisiche che caratterizzano il manufatto oggetto di analisi.

Il contributo, partendo dalla revisione delle schede adottate per la documentazione dell'edilizia storica in aree a rischio sismico all'interno del

grande progetto ministeriale dell'Atlante dei Tipi Costruttivi Murari d'Italia, si è proposto di illustrare, mediante un apposito caso studio esemplificativo, quello della Pieve di Sant'Agata, come l'apporto delle moderne tecnologie di rilievo abbia migliorato sensibilmente la registrazione del dato archeosismologico in senso qualitativo e quantitativo. Queste informazioni, una volta interpretate, permettono una piena conoscenza storico-costruttiva e sismica del singolo bene, aiutando in modo sensibile il processo di conoscenza storica del contesto di studio e allo stesso tempo migliorando la fase di documentazione, valutazione e progettazione degli interventi di restauro.

In questo articolo, sebbene non si sia cercato di arrivare a conclusioni sulle meccaniche dell'edificio, non avendone le competenze, si è cercato però di mettere in luce come le moderne tecnologie di rilievo, in particolare l'impiego del laser scanner e della fotogrammetria, se rapportate con la stratigrafia presente sulle superfici di un monumento, permettano di arrivare ad una conoscenza approfondita di un'architettura.

Da questa analisi risulta dunque molto chiaro come un monitoraggio specifico delle strutture, realizzato mediante strumenti che garantiscano precisione e affidabilità del dato ad una scala millimetrica, accompagnato da una serie di analisi multidisciplinari operate a diretto contatto con la loro fabbrica, possa fornire dati assolutamente importanti alla conoscenza di ogni edificio e alla progettazione delle possibili modalità di intervento più idonee in previsione di un futuro evento sismico. Dati che, se elaborati con carattere sistematico, permetteranno nel prossimo futuro di salvaguardare il patrimonio e le popolazioni di intere aree a rischio.

ANDREA ARRIGHETTI

École normale supérieure - Université PSL

AOROC, UMR 8546

andrea.arrighetti@ens.psl.eu

BIBLIOGRAFIA

- ARRIGHETTI A. 2015, *L'archeosismologia in architettura. Per un manuale*, Firenze, Firenze University Press.
- ARRIGHETTI A. 2016, *Materiali e tecniche costruttive del Mugello tra Basso Medioevo e prima età moderna*, «Archeologia de la Arquitectura», 13 (<http://dx.doi.org/10.3989/arq.arqt.2016.001>).
- ARRIGHETTI A. 2018, *Archeosismologia in architettura. Nuove prospettive di un dialogo multidisciplinare*, «Archeologia dell'Architettura», 23, 11-17.
- ARRIGHETTI A. 2019, *Registering and documenting the stratification of disruptions and restorations in historical edifices. The contribution of archaeoseismology to architecture*, «Journal of Archaeological Science: Reports», 23, 243-251 (<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2018.10.028>).
- ARRIGHETTI A., CANTISANI E., FRATINI F., LEPORINI R. 2022a, *Nuovi dati dall'analisi archeosismologica delle architetture della pieve di Sant'Agata del Mugello*, «Archeologia dell'Architettura», 27.1, in corso di stampa.

- ARRIGHETTI A., FRATINI F., MINUTOLI G., PANCANI G. 2022b, *Historical seismic events and their traces on Medieval religious buildings*, in S. D'AMICO, V. VENUTI (eds.), *Handbook of Cultural Heritage Analysis*, Springer International Publishing (https://doi.org/10.1007/978-3-030-60016-7_76).
- ARRIGHETTI A., MINUTOLI G. 2019, *A multidisciplinary approach to document and analyze seismic protection techniques in Mugello from the Middle Ages to Early Modern Time*, «Annals of Geophysics», 62,3 (<https://doi.org/10.4401/ag-7991>).
- BALLARDINI R. 1998, *Il programma di attuazione delle ricerche universitarie. Obiettivi e aree tecnico-scientifiche di integrazione. Le proposte normative. Relazione generale*, in R. BALLARDINI, M. GUCCIONE (eds.), *La protezione del patrimonio culturale. La questione sismica*, Roma, Gangemi, 71-79.
- BERTOCCI S., BINI M. 2012, *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, Novara, CittàStudi.
- BROGIOLO G.P., FACCIO P. 2010, *Stratigrafia e prevenzione*, «Archeologia dell'Architettura», 15, 55-63.
- BROGIOLO G.P., CAGNANA A. (eds.) 2012, *Archeologia dell'Architettura: metodi ed interpretazioni*, Firenze, All'Insegna del Giglio.
- MANNONI T., CICIRELLO C. 1998, *Atlante dei tipi costruttivi murari dell'Italia settentrionale*, in R. BALLARDINI, M. GUCCIONE (eds.), *La protezione del patrimonio culturale. La questione sismica*, Roma, Gangemi, 87-99.
- MINUTOLI G. 2012, *Il rilievo strutturale*, in S. BERTOCCI, M. BINI (eds.), *Manuale di rilievo architettonico e urbano*, Novara, CittàStudi, 317-338.
- MONTABERT A., DESSALES H., ARRIGHETTI A., CLEMENT J., LANCIERI M., LYON-CAEN H. 2020, *Tracing the seismic history of Sant'Agata del Mugello (Italy, Tuscany) through a cross-disciplinary approach*, «Journal of Archaeological Science: Reports», 33 (<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102440>).
- PEDUTO P., SACCONI T. 1998, *Atlante dei tipi costruttivi murari nell'Italia meridionale*, in R. BALLARDINI, M. GUCCIONE (eds.), *La protezione del patrimonio culturale. La questione sismica*, Roma, Gangemi, 101-111.
- REDI F., FORGIONE A., ROMITI E. 2012, *Rilevamento dell'edilizia storica e valutazione del danno sismico all'Aquila e territorio prima e dopo il 6 aprile 2009*, in F. REDI, A. FORGIONE (eds.), *Atti del VI Congresso degli Archeologi Medievisti Italiani*, Firenze, All'Insegna del Giglio, 763-768.

SITOGRAFIA

<http://recap.huma-num.fr>
<https://across-project.github.io/>

ABSTRACT

Knowledge is an essential operating procedure in any project involving direct intervention in historic buildings. Reading the stratification of natural and anthropic events on the architecture, providing the careful evaluation of its historical-constructive complexity, is a crucial step towards a full knowledge of the formal and physical characteristics of the building under analysis. The contribution, starting from the revision of the sheets used for documenting historical buildings in areas at seismic risk within the Ministry project of the 'Atlante dei Tipi Costruttivi Murari d'Italia', aims to illustrate, by means of a distinctive case study, that of the Pieve di Sant'Agata, how the contribution of modern surveying technology has significantly improved the recording of archaeo-seismological data both qualitatively and quantitatively. This information, once interpreted, provides a full historical, constructive and seismic understanding of the architectures, helping the process of historical knowledge of the context under study and, at the same time, the documentation, evaluation and planning of the restoration work.