PVBLICA

ReUSO 2024

Documentazione, restauro e rigenerazione sostenibile del patrimonio costruito

a cura di
Alessio Cardaci, Francesca Picchio, Antonella Versaci



ISBN: 978-88-99586-454

PVBLICA

ReUSO 2024

Documentazione, restauro e rigenerazione sostenibile del patrimonio costruito

a cura di
Alessio Cardaci, Francesca Picchio, Antonella Versaci

ISBN: 978•88•99586•454

Alessio Cardaci, Francesca Picchio, Antonella Versaci (a cura di)
Reuso 2024: Documentazione, restauro e rigenerazione sostenibile del patrimonio costruito
© PUBLICA, Alghero, 2024
ISBN 978 88 99586 454
Pubblicazione Ottobre 2024

I saggi contenuti in questo volume sono stati sottoposti
a referaggio cieco (*double blind peer review*) da parte di *referee*
facenti parte di un apposito comitato scientifico.

Dipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate
Università degli Studi di Bergamo

Dipartimento Ingegneria Civile Architettura DICAr
Università degli Studi di Pavia

Dipartimento di Ingegneria e Architettura
Università degli Studi di Enna "Kore"









PUBLICA
WWW.PUBLICAPRESS.IT



COMITATI

DIREZIONE SCIENTIFICA

Alessio Cardaci – Università degli Studi di Bergamo
Francesca Picchio – Università degli Studi di Pavia
Antonella Versaci – Università degli Studi di Enna 'Kore'

COMITATO D'ONORE

Sergio Cavalieri – Magnifico Rettore Università degli Studi di Bergamo
Elena Carnevali – Sindaco del Comune di Bergamo
Sergio Gandi – Vicesindaco del Comune di Bergamo, delegato alla Cultura e Rapporti con l'Università
Elisabetta Bani – Pro-Rettore Università degli Studi di Bergamo
Giuseppe Franchini –Direttore DISA – Università degli Studi di Bergamo
Andrea Penna – Direttore DICAr – Università degli Studi di Pavia
Francesco Castelli – Direttore DIA – Università degli Studi di Enna "Kore"
Francesca Fatta – Presidente UID – Unione Italiana Disegno
Rossella Salerno – Vicepresidente UID – Unione Italiana Disegno
Fabio Fatiguso – Presidente Ar.Tec. – Società Scientifica di Architettura Tecnica
Renata Picone – Presidente SIRA – Società Italiana per il Restauro dell'Architettura
Maurizio Caperna – Vicepresidente SIRA – Società Italiana per il Restauro dell'Architettura
Elena Svalduz – Presidente AISU – Associazione Italiana di Storia Urbana
Massimiliano Savorra – Vicepresidente AISU – Associazione Italiana di Storia Urbana
Edoardo Currà – Presidente AIPAI – Associazione Italiana per il Patrimonio Archeologico Industriale
Bernardo Naticchia - Presidente ISTeA - Italian Society Science Technology and Engineering of Architecture
Roberta Frigeni – Direttore del Museo delle Storie di Bergamo
Cristiana Iommi – Responsabile Biblioteca Civica Angelo Mai e Archivi storici
Giovanni Carlo Federico Villa – Presidente Ateneo di Scienze Lettere ed Arti
Laura Serra Perani – Vicepresidente Ateneo di Scienze Lettere ed Arti
Maria Mencaroni Zoppetti – Vicepresidente Ateneo di Scienze Lettere ed Arti
Sergio Tosato - Presidente della Fondazione Dalmine
Carolina Lussana - Vice-Presidente della Fondazione Dalmine
Mariangela Carlessi - Presidente della Fondazione 'Giusi Pesenti Calvi'

COMITATO SCIENTIFICO

Andrea Arrighetti – Università degli Studi di Siena
Marcello Balzani – Università degli Studi di Ferrara
Calogero Bellanca – Università degli Studi di Roma 'La Sapienza'
Andrea Belleri – Università degli Studi di Bergamo
Stefano Bertocci – Università degli Studi di Firenze
Daniela Besana – Università degli Studi di Pavia
Matteo Bigongiari – Università degli Studi di Firenze
Vanessa Borges Brasileiro – Universidade Federal de Minas Gerais
Maria Sole Brioschi – Università degli Studi di Bergamo
Susanna Caccia Gherardini – Università degli Studi di Firenze
Alessio Cardaci – Università degli Studi di Bergamo
Santi Cascone – Università degli Studi di Catania
Chiara Circo – Università degli Studi di Catania

Antonio Conte – Università degli Studi della Basilicata
Valentina Cristini – Universitat Politècnica de València
Fauzia Farneti – Università degli Studi di Firenze
Marinella Fossetti – Università degli Studi di Enna ‘Kore’
Emanuele Garda – Università degli Studi di Bergamo
Daniela Giretti – Università degli Studi di Bergamo
Alessandra Ghisalberti – Università degli Studi di Bergamo
Alessandro Greco – Università degli Studi di Pavia
Antonella Guida – Università degli Studi della Basilicata
Mariangela Liuzzo – Università degli Studi di Enna ‘Kore’
Nora Lombardini – Politecnico di Milano
Alessandra Marini – Università degli Studi di Bergamo
Giovanni Minutoli – Università degli Studi di Firenze
Camilla Mileto – Universitat Politècnica de València
Giulio Mirabella Roberti – Università degli Studi di Bergamo
Susana Mora Alonso-Muñoyerro – Universidad Politécnica de Madrid
Marco Morandotti – Università degli Studi di Pavia
Maurizio Oddo – Università degli Studi di Enna ‘Kore’
Luis Palmero Iglesias – Universitat Politècnica de València
Caterina Palestini – Università degli Studi “G. d’Annunzio” Chieti-Pescara
Elisabetta Palumbo – Università degli Studi di Bergamo
Sandro Parrinello – Università degli Studi di Firenze
Francesca Picchio – Università degli Studi di Pavia
Davide Prati – Università degli Studi di Bergamo
Monica Resmini – Università degli Studi di Bergamo
Marco Ricciarini – Università degli Studi di Pavia
Paolo Riva – Università degli Studi di Bergamo
Emanuele Romeo – Politecnico di Torino
Riccardo Rudiero – Politecnico di Torino
Giuseppe Ruscica – Università degli Studi di Bergamo
Massimiliano Savorra – Università degli Studi di Pavia
Barbara Scala – Università degli Studi di Brescia
Marco Tanganelli – Università degli Studi di Firenze
Ilaria Trizio – Istituto per le Tecnologie della Costruzione CNR
Silvio Van Riel – Università degli Studi di Firenze
Fernando Vegas López-Manzanares – Universitat Politècnica de València
Antonella Versaci – Università degli Studi di Enna ‘Kore’
Maria Rosaria Vitale – Università degli Studi di Catania

SEGRETERIA ORGANIZZATIVA

Pietro Azzola– Università degli Studi di Bergamo
Sara Brescia – Università degli Studi di Pavia
Gabriele Daleffe – Università degli Studi di Bergamo
Anna Dell’Amico – Università degli Studi di Pavia
Elisabetta Doria – Università degli Studi di Pavia
Luca Renato Fauzia – Università degli Studi di Enna ‘Kore’
Francesca Galasso – Università degli Studi di Pavia
Silvia La Placa – Università degli Studi di Pavia
Monica Lusoli – Università degli Studi di Firenze
Giulia Porcheddu – Università degli Studi di Pavia
Michele Russo – Università degli Studi di Enna ‘Kore’

COMITATO FONDATORE ASSOCIAZIONE ReUSO

Stefano Bertocci – Università degli Studi di Firenze
Fauzia Farneti – Università degli Studi di Firenze
Giovanni Minutoli – Università degli Studi di Firenze
Susana Mora Alonso-Muñoyerro – Universidad Politécnica de Madrid
Silvio Van Riel – Università degli Studi di Firenze

CON IL SUPPORTO DI

BERGAMO CITTÀ DEI MILLE
COMUNE DI BERGAMO

MUSEO DELLE STORIE

Biblioteca Civica A. Mai
e Archivi storici

CON IL PATROCINIO DI

unione italiana disegno

SIRA

Ar.Tec.
Società Scientifica di Architettura Tecnica

AISU

AIPAI ETS
ASSOCIAZIONE ITALIANA PER IL PATRIMONIO ARCHEOLOGICO INDUSTRIALE

ISTeA
Italian Society of science, Technology and Engineering of Architecture

Fondazione Dalmine

GIUSI PESENTI CALVI
FONDAZIONE ETS

FIEB
FONDAZIONE ISTITUTI EDUCATIVI BERGAMO

ATENEO DI SCIENZE LETTERE ARTI BERGAMO

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI BERGAMO

ANCE BERGAMO

SPONSOR

GEXCEL
GEOMATICS & EXCELLENCE

MicroGeo



XII^th ReUSO Edition
Documentation, Restoration and Reuse of Heritage
29-31 October 2024, Bergamo, Italy

CHIESE EMILIANE E STORIA SISMICA RECENTE: UN'INDAGINE SULL'(IN)EFFICACIA DEGLI INTERVENTI PREGRESSI

CHURCHES IN EMILIA AND RECENT SEISMIC HISTORY: A STUDY ON THE (IN)EFFECTIVENESS OF PAST INTERVENTIONS

Elena Zanazzi - Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università di Parma, Parma, Italia, e-mail: elena.zanazzi@unipr.it
Luca Leoni - Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università di Parma, Parma, Italia, e-mail: luca.leoni@unipr.it

Abstract: This research aims to analyze the strengthening interventions realized on churches after the 1996 earthquake in the Emilia area, in order to verify their real performance considering the damage suffered during the 2012 earthquake. In fact, both seismic events affected areas in the provinces of Reggio Emilia and Modena (in the North of Italy). In particular, this paper focuses on the analysis, at different scales, of two intervention typologies frequently adopted: tie-rod systems to prevent the overturning of the main facade and reinforced concrete slab for the consolidation of the vaults. For the evaluation of their effectiveness, a statistical analysis was carried out, at a territorial scale, through the design of a GIS database, and an in-depth analysis of three case studies.

Keywords: Heritage, Seismic Risk, Emilia Earthquake, Strengthening Interventions, Masonry.

1. Introduzione

Ogni evento sismico - e la successiva fase emergenziale - determina una perdita, se pur spesso solo temporanea, degli spazi di aggregazione delle comunità colpite [1]. Tra questi, le chiese non solo rappresentano un luogo identitario per la collettività, ma, tra le tipologie di edifici storici in muratura, che costituiscono un'ampia percentuale del tessuto costruito, si sono rivelate anche le maggiormente vulnerabili, a causa della loro tipica conformazione a grandi aule, priva di solai intermedi. Analogamente i relativi campanili tendono a presentare problemi di instabilità, legati a fenomeni di ribaltamento, che, data la snellezza di tali manufatti, ha spesso comportato la necessità di interdire l'accesso ai centri storici alla popolazione residente [2; 3], con consistenti implicazioni anche sociali.
Per la salvaguardia di tali beni e anche del loro intorno, un ruolo di grande importanza è rivestito dalla conoscenza materica del bene e delle sue vulnerabilità [4]. Se da un lato l'interpretazione dei meccanismi di dissesto di queste grandi fabbriche – basata sull'osservazione sistematica del danno terremoto dopo terremoto – è ormai ampiamente consolidata [5; 6] ed è stata recepita anche dalla normativa [7], dall'altro è necessario considerarne anche la storia costruttiva [8; 9]. Infatti, gli interventi pregressi, se realizzati con materiali incongrui, possono alterare la risposta sismica dell'edificio e aggravarne il quadro fessurativo all'indomani di un nuovo evento sismico [10].
Dunque, è oggi fondamentale provare ad applicare lo stesso metodo di analisi empirico-comparativa anche alla comprensione degli effetti e dell'eventuale efficacia, alla luce dei recenti - e ripetuti - eventi sismici, degli interventi di consolidamento fino ad ora messi in opera per tale tipologia architettonica.

Chiesa di S. Martino a Correggio (a sinistra).

A tal proposito, il presente contributo si focalizza sulle chiese emiliane colpite da due terremoti: il primo risalente al 15 ottobre del 1996, con epicentro in provincia di Reggio Emilia, il secondo al 20 e 29 maggio del 2012 con epicentro a Nord-Est della provincia di Modena. In particolare, si intende illustrare un primo censimento di due degli interventi di consolidamento più comunemente realizzati sulle chiese a seguito del sisma del 1996, al fine di verificarne l'(in)efficacia alla luce dei danni rilevati post-sisma 2012. Inoltre, per i tre casi studio illustrati nel paragrafo 3, si è tenuto conto anche dei danni, e dei relativi interventi di consolidamento, rilevati a seguito di un ulteriore evento sismico, verificatosi il 18 giugno 2000, con epicentro a Bagnolo in Piano, provincia di Reggio Emilia, avente una magnitudo di 4.5.

2. Progettazione di un database GIS come strumento di conoscenza

La catalogazione dei suddetti interventi si estende entro i confini dell'area di intersezione dei due crateri sismici sopracitati, in cui si collocano oltre 100 chiese danneggiate dal sisma del 1996 (fig. 1). È quindi di fondamentale importanza adottare un approccio efficace di gestione dei dati, anche con il supporto di strumenti informativi come i sistemi GIS, che permettono di raccogliere e analizzare grandi quantità di dati eterogenei, rendere tutte le informazioni georeferenziate e interrogabili, gestire lo scambio di informazioni e orientare i metodi di conservazione e gestione verso strategie efficaci [11]. In tale ottica, una volta definiti i modelli di astrazione (logico e fisico), è stato progettato un primo database GIS, con il software open-source QGIS, popolato con i confini provinciali e comunali [12]; le *shakemaps* degli eventi sismici del 20 e 29 maggio del 2012 [13] e lo *shapefile* relativo a 20 chiese danneggiate (fig. 1), la cui tabella attributi è stata implementata con i dati relativi all'intensità sismica subita nel 1996 [14], al danno e agli interventi. In particolare, a ciascuna chiesa è associato il codice identificativo univoco desunto dal WebGIS del Patrimonio della Regione Emilia-Romagna [15], in un'ottica di possibile interoperabilità futura. Mentre le informazioni relative ai danni di ogni chiesa sono state catalogate nella tabella attributi associando a ciascuno dei 28 meccanismi previsti dalla normativa [7] un livello di danno secondo una scala che va da 0, assenza di dissesti, a 5 crollo del macro-elemento [16]. L'attribuzione del livello di danno è stata dedotta per il sisma del 1996 dalle relazioni tecniche e dal materiale fotografico consultato presso l'Archivio della Soprintendenza ABAP di Bologna; mentre per il terremoto del 2012 ci si è affidati principalmente ai dati desunti dalle schede di Rilievo del danno [7]. Successivamente, sulla base di quanto riportato nelle relazioni di progetto conservate presso il suddetto archivio, è stato stilato un elenco dei principali interventi strutturali messi in opera a seguito dei danni causati dal sisma del 1996, definendoli secondo un lessico uniforme.

La catalogazione, in ambiente GIS, è stata poi effettuata associando a ciascun meccanismo di danno gli interventi che dovrebbero evitarne l'attivazione in futuro. Ad esempio, al meccanismo di ribaltamento fuori dal piano della facciata principale è stato possibile associare presidi sismici, quali sistemi di tiranti metallici a varie quote o cordoli in sommità, ma anche soluzioni locali quali scuci-cuci per la risarcitura delle lesioni sui muri trasversali alla facciata. Da una prima analisi dei casi studio selezionati è stato possibile riscontrare l'adozione di alcune soluzioni strutturali analoghe e ricorrenti, probabilmente in quanto suggerite dai manuali dell'epoca [8; 17]. Tale ricorrenza ha permesso di effettuare analisi statistico-comparative sull'efficacia di alcuni tra gli interventi maggiormente diffusi, verificando il livello di danno del meccanismo interessato in seguito alle due soglie storiche scelte. In particolare, il presente contributo si focalizza sullo studio dell'efficacia dei sistemi di tiranti per evitare il ribaltamento fuori dal piano della facciata, cinematismo denominato M1 in [7], e delle cappe in betoncino con rete elettrosaldata messe in opera sulle volte dell'aula o navata principale, M8 in [7]. Nei casi studio, approfonditi nel paragrafo 3, sono stati inoltre considerati ulteriori cinematismi, in quanto coinvolti dagli interventi in esame. Nello specifico: meccanismi di sommità della facciata (M2), danni nel protiro (M4) e alle volte delle navate laterali (M9) [7].

3. Approfondimento di tre casi studio e di due tipologie di intervento applicate

L'analisi degli interventi selezionati è stata approfondita a scala architettonica per tre chiese collocate nel comune di Correggio, in provincia di Reggio Emilia. Il confronto delle soluzioni tecnologiche adottate è agevolato da alcune analogie: i tre edifici hanno uno sviluppo longitudinale e sono privi di transetto e di cupola; due edifici hanno solo una navata (Santa Maria della Misericordia e Santissima Annunziata, quest'ultima con cappelle laterali), mentre la chiesa di San Martino Vescovo ha navate laterali, di dimensioni ridottissime, che ospitano le cappelle con gli altari laterali. Inoltre, gli edifici hanno subito le medesime intensità sismiche, essendo localizzati a pochi chilometri di distanza tra loro: nel 15 ottobre 1996 venne registrata un'intensità pari a 7 e di 5 per il sisma del 18 giugno del 2000 [14]. Mentre le azioni massime registrate nella stessa area nel 2012 furono di 0,08 Peak Ground Acceleration (PGA), corrispondenti a un'intensità compresa tra 6 e 7 [13].

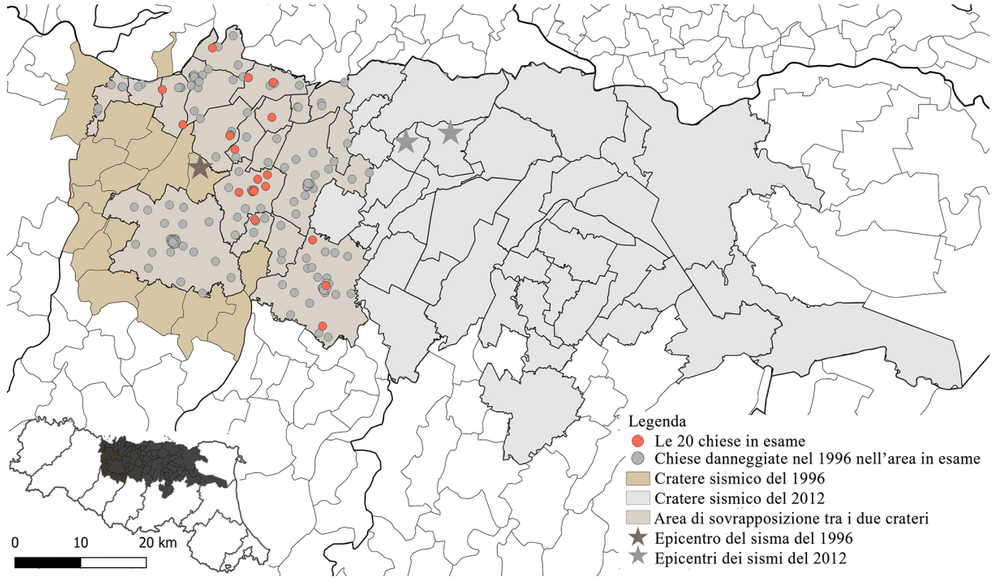


Fig. 1 - Le 20 chiese esaminate collocate nell'area di intersezione dei due crateri sismici del 1996 e 2012.

3.1 Casi di studio e relativi danni post-sisma 1996

3.1.1. Chiesa della Santissima Annunziata a Correggio

L'attuale chiesa ha una larga navata principale coperta da volta a botte, affiancata da cappelle laterali poco profonde, anch'esse voltate a botte e divise da setti murari, e profondo presbiterio e abside (fig. 2). L'attuale assetto risale alla metà del 1700, quando la chiesa precedente venne ampliata a cinque altari (due per lato oltre a quello nel presbiterio) e due piccoli ambienti-cappella a destra e a sinistra dell'ingresso. Presenta un'elegante facciata bipartita da un'alta cornice marcapiano con frontone timpanato e pinnacoli di coronamento (fig. 2). Sul lato Nord, la chiesa è affiancata dal campanile, che nella parte bassa confina con una cappella laterale. Sul lato Sud, l'ultimo tratto di volta della navata centrale e il presbiterio sono affiancati dalla sagrestia e da un altro ambiente di servizio. Il sisma del 1996 ha causato un ribaltamento della facciata principale (meccanismo M1 con livello di danno 2; meccanismo M2 con livello di danno 1). L'attivazione di tale meccanismo ha comportato danni anche alla volta a botte in foglio adiacente alla facciata e numerose fessurazioni parallele all'asse della volta imputabili al ribaltamento della facciata stessa (meccanismo M8 con livello di danno 2; meccanismo M9 con livello di danno 2).

3.1.2. Chiesa di Santa Maria della Misericordia a Correggio

La chiesa venne edificata nei primi anni del XVI secolo. L'aula, a navata unica affiancata da altari, è coperta da tre volte a crociera a sesto ribassato (fig. 3), composte da una doppia camicia di muratura, con costoloni all'estradosso che ne determinano, oltre ad un notevole spessore, un elevato peso. Per sostenerne il peso furono costruiti robusti archi a sesto ribassato, che divisero la chiesa in tre campate. All'inizio del XVIII secolo fu costruita la nuova facciata della chiesa così come ancora oggi la si vede. L'antico portico a colonne di marmo fu sostituito da una più solida struttura in muratura, composta da pi-

lastri quadrangolari e volte a crociera, sormontata da un'ampia cantoria posta sopra il portico. Dal 1756 al 1758, tutto il complesso fu interessato da un nuovo grande intervento di restauro. Parte dell'intervento fu mirato al completamento della facciata della chiesa. Nel 1837 fu costruita la torre campanaria, ultimata nel 1853. A seguito dei sismi del 1996 e del 2000 si erano aperte lesioni diffuse nelle ammorsature imputabili ad un principio di ribaltamento della facciata (meccanismo M1 con livello di danno 2), su tutte le volte, gli archi e le murature del portico in facciata (meccanismi M4 ed M3 con livello di danno 3). Negli archi del porticato su Via Santa Maria alcune catene erano assenti, altre erano sottodimensionate.

3.1.3. Chiesa di San Martino Vescovo a Correggio

La chiesa, fondata nel X secolo, dopo successive modifiche, venne completamente riedificata nel 1892 [24]. Attualmente presenta una facciata compatta, con arco trionfale sormontante una trifora centrale e contornato da due torri cave in muratura (fig. 4). L'interno è diviso in tre navate, con quella centrale molto più ampia. Il soffitto è voltato a botte con lunette nella navata centrale, mentre le navate laterali sono coperte da voltine in foglio a botte (per entrambe la tessitura dei laterizi è ortogonale alla linea dell'arco). Sulla navata centrale si affaccia un matroneo distribuito sui due lati. Già nel 1959 era avvenuto un cedimento di fondazione sotto l'elemento posto allo spigolo Nord della facciata, che ha forma di un torrino e che causò un quadro fessurativo in facciata con lesioni a 45° e subverticali segnalanti il distacco del torrino stesso. Il sisma del 1996 ha provocato il ribaltamento della parte superiore della facciata (meccanismo M2 con livello di danno 2) e l'attivazione di azioni di taglio sulle volte a crociera e a botte, con crolli parziali nella volta in controfacciata e in quella adiacente al presbiterio (meccanismo M8 con livello di danno 5; meccanismo M9 con livello di danno 4), causati dal martellamento dei corpi di fabbrica contigui. L'instabilità delle volte è stata accentuata dall'assenza di catene longitudinali a contrasto delle spinte degli archi bassi e degli archi sostenenti le volte di navata, che hanno causato anche ampie fessurazioni in chiave. Il sisma del 2000 ha causato nuovamente un quadro fessurativo abbastanza articolato sulle volte della navata centrale, in particolare in corrispondenza delle unghie. Inoltre, si sono verificati gravi danni nel camminamento sopra gli altari laterali, a causa delle deformazioni fra il muro perimetrale esterno e la volta che sovrasta gli altari.

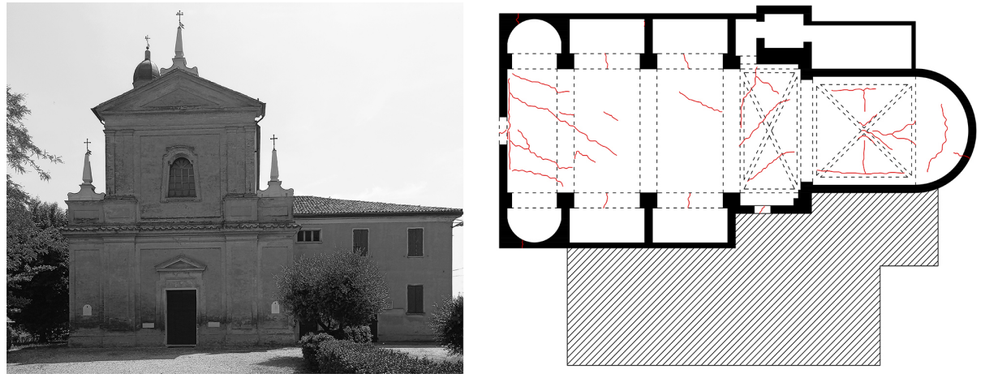


Fig. 2 - Chiesa della SS. Annunziata a Correggio e relativa pianta schematica con il quadro fessurativo rilevato post-sisma 1996.

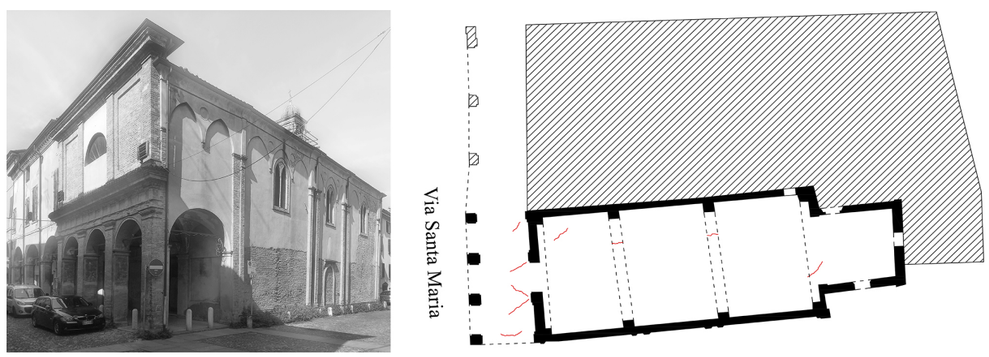


Fig. 3 - Chiesa di S. Maria della Misericordia a Correggio e relativa pianta schematica con il quadro fessurativo rilevato post-sisma 1996.

3.2. Interventi di consolidamento e comportamento a seguito del sisma 2012

3.2.1. Sistemi di tiranti per evitare il ribaltamento della facciata principale

Dall'analisi del materiale d'archivio [18], è stato possibile riscontrare che nella prima chiesa sono state inserite due catene metalliche parallele alle murature perimetrali longitudinali, per il consolidamento della facciata, poste all'estradosso della volta a botte della navata (fig. 5) e ancorate con capochiave interni. Le piastre esterne visibili in facciata (fig. 3) furono invece messe in opera in una fase precedente. Sono stati inoltre eseguiti l'intagliolamento e la risarcitura della lesione apertasi a causa della rotazione della facciata. L'intervento non ne ha tuttavia impedito la riattivazione, ma sembra aver migliorato la risposta al sisma del macro-elemento. Infatti, con il terremoto del 2012, il cinematismo indagato si è ripresentato con danni di entità lieve (il meccanismo M1 è passato da livello di danno 2 a livello 1, il meccanismo M2 da livello di danno 1 a 0) [19].
Nella seconda chiesa, dopo il sisma del 2000, si è provveduto ad inserire catene metalliche di presidio nel portico di facciata (fig. 6), sia all'interno che all'esterno, sia parallele che ortogonali al porticato, collegate con tasselli chimici o con paletti capochiave tirantati con prigionieri [20]. Sono stati inseriti tiranti metallici di presidio per evitare il ribaltamento della facciata, ancorati ai muri perimetrali tramite piastre metalliche. Questi sono posti sopra il cornicione che divide circa a metà la facciata. I tiranti in corrispondenza della facciata non hanno migliorato la risposta sismica; infatti, non sono stati sufficienti ad impedire ulteriori danni a seguito del sisma del 2012 (il meccanismo M1 si è ripresentato al livello di danno 2, il meccanismo M2 è passato da livello 0 a 2) [21]. Bisogna tenere presente che, a differenza delle altre due chiese, in questo caso le catene della facciata, non affiancando l'aula liturgica in tutta la sua lunghezza, non garantiscono il comportamento scatolare auspicabile. Inoltre, la chiesa, e la facciata in particolare, costituendo l'estremità Nord-Est di un vastissimo aggregato urbano, risultano particolarmente vulnerabili ai meccanismi di ribaltamento fuori dal piano [22]. Tale circostanza, unitamente alla tipica assenza di adeguati ammorsamenti tra fabbriche non coeve, pur appartenenti al medesimo isolato, può aver aggravato gli effetti delle azioni sismiche sulla facciata stessa [23].
Nella terza chiesa, dopo il sisma del 1996, sono state inserite catene in corrispondenza del matroneo [24], a un livello superiore rispetto a quelle già presenti negli archi longitudinali. Le due nuove catene, con la loro continuità lungo tutta la navata, sono state inserite come presidio al ribaltamento della facciata, ancorandosi all'interno dell'intercapedine retrostante l'arco trionfale posto a ingresso del fabbricato (fig. 7). Tuttavia, i due ordini di catene sono stati disposti a quote ravvicinate a circa metà

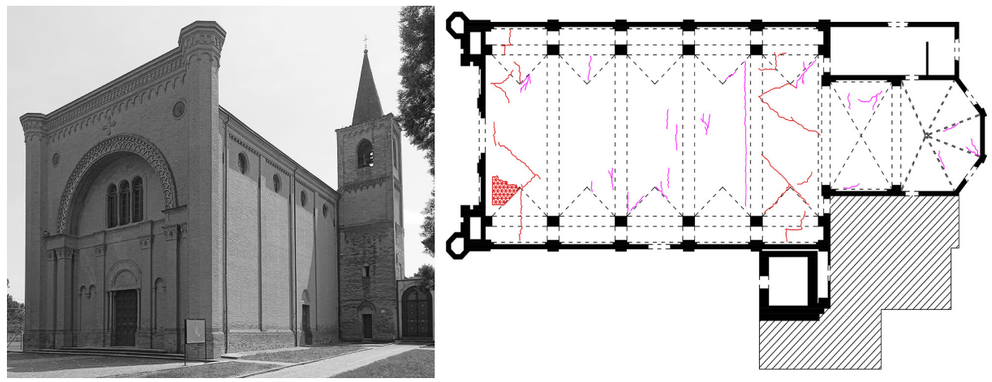


Fig. 4 - Chiesa di S. Martino a Correggio e relativa pianta schematica con i quadri fessurativi rilevati post-sisma 1996 (in rosso) e 2000 (in viola).

dell'altezza del fronte. La soluzione adottata quindi non costituisce un presidio efficace al ribaltamento della parte sommitale della facciata stessa, peraltro caratterizzata da una doppia e pesante muratura al di sopra dell'arcone d'ingresso. All'inserimento delle catene, si sono accompagnati diversi interventi che dovevano contribuire a risolvere i cedimenti della facciata: realizzazione di una palificata nel sistema fondale dello spigolo Nord, risarcitura delle lesioni con malta espansiva e cuci-scuci, cuciture armate in corrispondenza delle sconnessioni tra muri longitudinali e facciata.
Tuttavia, con il sisma del 2000, i torrini angolari in facciata si sono nuovamente distaccati dai muri longitudinali ed è stato necessario eseguire nuove operazioni di cuci-scuci e inserire barre di acciaio ad aderenza migliorata in perforazioni sia nel muro perimetrale che nel torrino Nord. Anche a causa delle vulnerabilità specifiche menzionate, il complesso di interventi sulla facciata non sembra essere però stato sufficiente a impedire la riattivazione del cinematismo in occasione del terremoto del 2012 (i meccanismi di danno sono rimasti al medesimo livello di danno: M1 a livello 0, M2 a livello 2), a seguito del quale sono stati necessari nuovi interventi [25].

3.2.2. Cappa in betoncino e rete elettrosaldata sulle volte dell'aula

Nella prima chiesa, la volta a botte in foglio adiacente alla facciata, danneggiata e parzialmente crollata a causa del martellamento con la facciata stessa, è stata puntellata tramite centinatura e la parte crollata è stata ricostruita. Successivamente, la volta è stata consolidata mediante applicazione all'estradosso di una cappa in beton-epossidico con rete elettrosaldata (fig. 5) confinata da cordolatura di maggiore spessore. Le lesioni intradossali sono state intagliolate e risarcite. In prospettiva di future sollecitazioni dinamiche di tipo orizzontale, sono stati eliminati gli eventuali effetti di martellamento creando un giunto tra i due elementi strutturali (volta e facciata) tramite interruzione della continuità materiale ed è stato irrigidito il bordo della volta in foglio con il cordolo.
Il progettista ha previsto la realizzazione di una cappa in beton-epossidico (conglomerato epossidico composto da calcestruzzo in cemento, resina pura strutturale e sabbie quarzifere sterilizzate) con rete elettrosaldata per consolidare, tramite impregnazione a profondità controllata, il materiale costitutivo della volta. Sono stati rilevati danni in chiave e perdita di geometria anche dell'arco che confina con la volta a botte. Tale elemento è stato centinato e la geometria originale è stata ripristinata con cuci-scuci.
Il consolidamento con betoncino e rete elettrosaldata è stato esteso anche alle volte interne ed al catino absidale per conferire uniforme rigidezza strutturale a tutto il comparto e omogeneizzare il comportamento alle sollecitazioni dinamiche di tipo sismico. Si è aggiunto l'apporto di un rinfianco di materiale alleggerito per limitare la snellezza della volta. Inoltre, gli interventi post-sisma 1996 hanno risolto una vulnerabilità specifica: nel sottotetto il puntone gravava su un pilastro appoggiato sull'arco trionfale sopra il presbiterio, generando un carico concentrato. Il pilastro è stato sostituito con una nuova capriata lignea [18]. L'intervento nel complesso è stato migliorativo: le volte non si sono danneggiate in seguito al sisma del 2012 [19]. Nella seconda chiesa solo le volte del portico su Via Santa Maria sono state consolidate tramite cuci-scuci delle lesioni, intagliolamento con cunei in ferro, risarcitura con malta ad espansione e resine epossidiche all'intradosso e realizzazione di una cappa in betoncino a base di calce idraulica additivata, con rete elettrosaldata (fig. 6) [20]. Nella terza chiesa sono state ricostruite le parti crollate delle volte, consolidandole mediante strato di betoncino sulla volta in controfacciata e su quella adiacente il presbiterio nella navata principale e su quelle corrispondenti nelle navate laterali (fig. 7). Negli interventi a seguito del sisma del 2000, sui camminamenti sopra gli altari laterali (matroneo) in corrispondenza delle volte centrali della navata, è stata realizzata una cappa in calcestruzzo alleggerito a base di calce idraulica, spessore minimo 5 cm, armata con rete elettrosaldata (maglia 10x10, Ø 6 mm) e collegata alle pareti laterali con barre ad aderenza migliorata (Ø 12 mm) in ragione di almeno 3 fori al m [24]. L'intervento si è rivelato solo parzialmente efficace: le lesioni e le fessurazioni causate dal sisma del 2012 sono state di minore gravità rispetto a quelle causate dal sisma precedente e si sono concentrate soprattutto sulle tre volte sulle quali non era stata realizzata la cappa (meccanismo M8 da livello di danno 5 a livello 2, meccanismo M9 da livello 4 a 0). La non omogeneità dell'intervento ha provocato una migrazione delle sollecitazioni sulle aree non rinforzate [25]. Bisogna considerare anche che la realizzazione della cappa sulle volte è stata accompagnata dall'inserimento di catene negli archi longitudinali e negli archi del matroneo (fig. 7), che hanno contribuito ad impedire deformazioni delle volte e degli archi che le sorreggono.

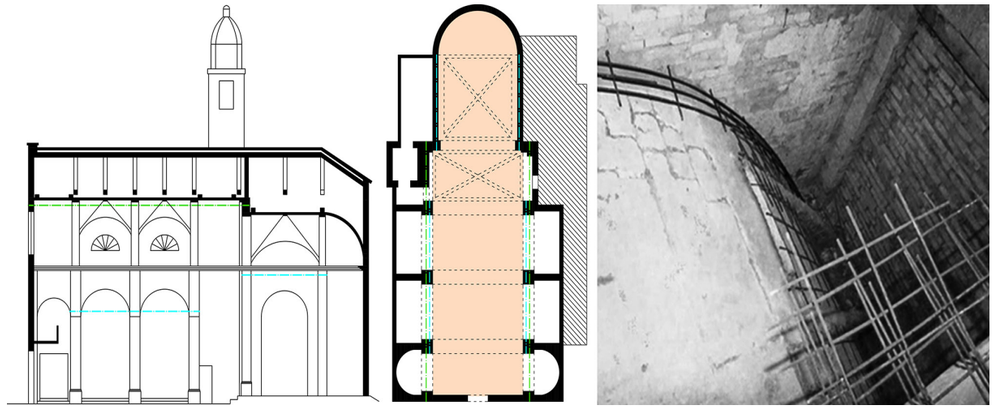


Fig. 5 - Da sinistra: sezione e pianta della chiesa della SS. Annunziata, con incatenamento della facciata e cappe in betoncino (in arancione) realizzate post-sisma 1996; vista in estradosso della volta di controfacciata con la messa in opera della cappa [19].

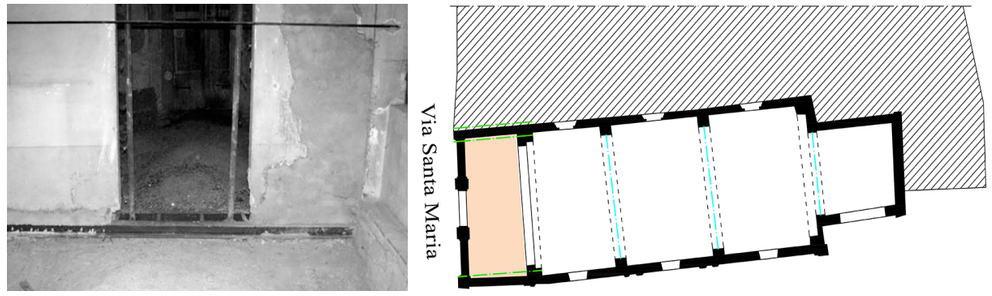


Fig.6 - Da sinistra: vista dell'incatenamento longitudinale della facciata della chiesa di S. Maria della Misericordia [26]; pianta della suddetta chiesa con evidenziati gli interventi eseguiti.

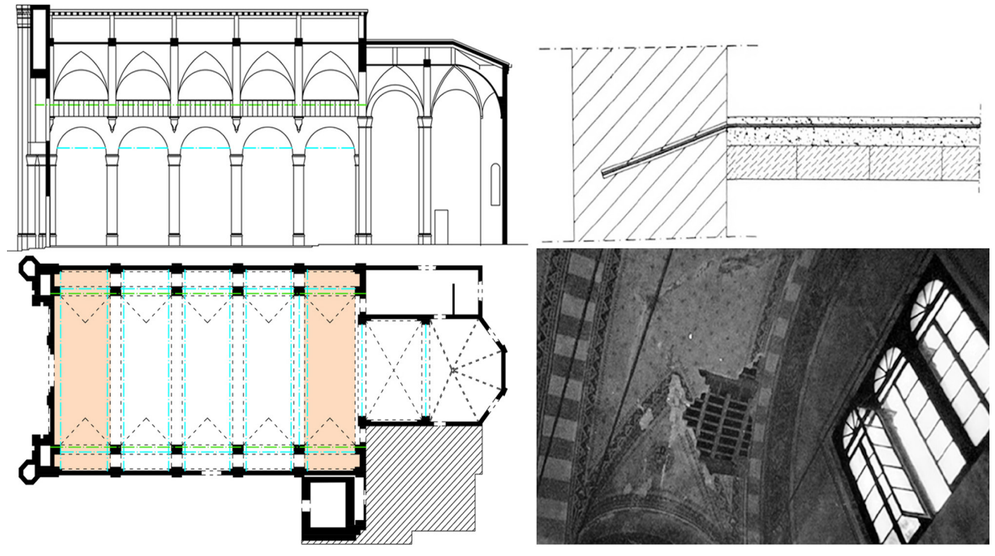


Fig. 7 - Da sinistra: sezione e pianta della chiesa di S. Martino, con incatenamento della facciata e cappe in betoncino (in arancione) realizzate post-sisma 1996; dettaglio schematico della cappa; crollo locale della volta in controfacciata [24].

4. Interrogazione del database GIS: efficacia e criticità a scala territoriale delle due tipologie di intervento indagate

Grazie alla progettazione del database GIS, è stato possibile effettuare interrogazioni di tipo tabellare e spaziale, traendo alcune prime considerazioni sull'efficacia e sulle criticità delle due tipologie di intervento messe in opera post-sisma 1996, alla luce delle azioni sismiche subite in occasione dello sciame sismico del 2012 e dei conseguenti danni. La valutazione dell'efficacia viene effettuata confrontando il livello di danno attribuito sulla base del materiale progettuale prodotto post-sisma 1996 e quello tratto dalle schede di rilievo del danno compilate a valle del sisma del 2012.

Analizzando i livelli di danno relativi al terremoto del 1996, è stato possibile riscontrare che, su 20 chiese studiate, 17 presentano il dissesto alle volte dell'aula o navata principale e 11 l'attivazione del meccanismo di ribaltamento fuori dal piano della facciata principale, di queste ultime per ben 10 è possibile riscontrare danni anche alla volta di controfacciata (fig. 8a). Infatti, come noto, le volte tendono maggiormente a danneggiarsi in corrispondenza dei macro-elementi più rigidi (facciata e arco trionfale). Inoltre, è emerso che, per la maggior parte dei casi, i livelli di danno sembrano ridursi in occasione del terremoto più recente. Va infatti considerato che le accelerazioni sismiche registrate nel 2012, nell'area in esame, sono state di entità minore - comprese tra 0,04 e 0,08 in termini di PGA - rispetto a quelle subite nel 1996. In particolare, su 11 chiese danneggiate per ribaltamento della facciata, 9 presentano la messa in opera di sistemi di tiranti in facciata e per ben 6 di queste (fig. 8b), l'intervento ha evitato l'attivazione del meccanismo - o per lo meno ne ha diminuito gli effetti - in occasione dell'evento sismico del 2012. Mentre su 17 chiese con danni alle volte dell'aula, 6 presentano la messa in opera in estradosso della già descritta cappa in betoncino. Per quattro di questi casi, il cinematismo non si è riattivato nel 2012 (fig. 8b). In questa fase della ricerca pare quindi opportuno concentrarsi su quei casi studio che riportano un aggravamento del livello di danno, nonostante le accelerazioni sismiche ridotte, nell'ottica di comprenderne le vulnerabilità. A tal proposito, il sistema di tiranti in facciata sembra non essere stato sufficiente per tre chiese: la Chiesa di Santa Maria della Misericordia e la Chiesa di San Martino, entrambe a Correggio, già illustrate nel paragrafo 3, e la Chiesa di San Giorgio a Luzzara. Per le prime due, nonostante la corretta messa in opera di sistemi di tiranti su due quote, la riattivazione del meccanismo può essere imputabile a condizioni particolari al contorno - corpi di fabbrica in adiacenza e presenza di un porticato antistante per la prima; cedimenti differenziali del terreno e ammorsamento inefficace dei "torrini" che affiancano la facciata per la seconda - che possono senz'altro costituire elementi di vulnerabilità specifica. Contrariamente, nella Chiesa di San Giorgio a Luzzara è possibile riscontare la sola messa in opera di tiranti alla quota dell'imposta delle volte, a circa 1/3 dell'altezza della facciata; quindi, probabilmente insufficienti a impedirne il ribaltamento della porzione sommitale. La soluzione di sistemi di tiranti su quote diverse è invece stata coerentemente adottata per le cinque chiese che, nel 2012, non presentano più l'attivazione di tale cinematismo. Per quanto riguarda gli interventi con cappa in betoncino, solo in due casi sembra ripresentarsi il meccanismo di danno alle volte dell'aula, se pur in gravità ridotta: Chiesa di San Martino e Chiesa di San Salvatore, entrambe a Correggio. In entrambi i casi la soluzione strutturale è stata messa in opera solo per la prima e l'ultima volta a copertura della navata. Tale circostanza potrebbe aver introdotto una maggiore rigidezza delle volte alle estremità, implicando l'attivazione del meccanismo sulle sole volte centrali a valle del sisma del 2012, introducendo dunque una nuova vulnerabilità, spostando la variazione di rigidezza alle campate limitrofe.

Per gli altri casi esaminati, in cui il meccanismo di danno alle volte non si riattiva nel 2012, va tenuto presente che lo spessore delle cappe messe in opera era esiguo.

Altra variante da considerare, come già accennato, è legata alla coeva messa in opera, nei progetti post-sisma 1996, di sistemi di tiranti in corrispondenza dell'imposta delle volte. Soluzione tecnologica che potrebbe aver concorso nella drastica riduzione della gravità dei livelli di danno in occasione del terremoto del 2012, ma di cui è difficile scindere gli effetti rispetto all'intervento con la cappa.

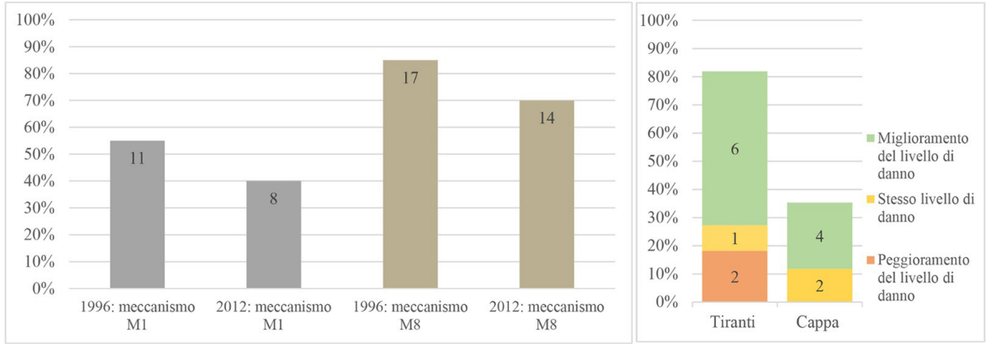


Fig. 8 - A sinistra, la percentuale di attivazione dei due meccanismi indagati - M1 ribaltamento della facciata e M8 danni alle volte dell'aula - nel 1996 e nel 2012. A destra, la percentuale di efficacia dei due interventi messi in opera per contrastare rispettivamente i due cinematismi citati.

5. Conclusioni

La conoscenza della storia costruttiva del bene, e quindi di eventuali interventi pregressi che possono pregiudicarne la conservazione materiale, risulta dunque di fondamentale importanza. Alla luce di questa consapevolezza, il presente contributo, prendendo in esame la tipologia chiese e due soglie temporali significative per la storia sismica recente della regione Emilia-Romagna, tenta di validare una metodologia ad ampia scala per la valutazione dell'efficacia di alcune soluzioni strutturali particolarmente diffuse a seguito del terremoto del 1996, attraverso l'ausilio di sistemi informativi GIS. In particolare, è stato possibile riscontrare che la gravità dei livelli di danno sembra minore a seguito del sisma del 2012. Le ragioni sono probabilmente da ricercare in parte in una minore intensità delle azioni sismiche subite durante il terremoto più recente nell'area analizzata, in parte nella reale efficacia di alcune soluzioni. Ad esempio, la messa in opera di un solo sistema di tiranti, all'imposta delle volte, non è stata sufficiente a impedire la riattivazione del meccanismo di ribaltamento della facciata, al contrario di quanto accaduto per le chiese in cui è stato adottato un doppio sistema di tiranti a quote diverse. Per quanto riguarda la soluzione tecnologica della cappa in betoncino sulle volte dell'aula, al momento sembra in alcuni casi aver introdotto nuove vulnerabilità, specie quando applicata in modo non omogeneo, mentre risulterebbe efficiente se associata alla messa in opera di tiranti.

Tuttavia, tali considerazioni risultano al momento parziali e dovranno essere validate attraverso l'inserimento di ulteriori dati in ambiente GIS. Inoltre, anche grazie all'approfondimento di alcuni casi studio, è stato possibile comprendere possibili vulnerabilità specifiche legate alla complessità e unicità del singolo bene. In conclusione, se correttamente utilizzati, gli strumenti digitali possono garantire una gestione della conoscenza in maniera univoca e continuativa nel tempo, primo fondamentale passo per la programmazione di strategie conservative a lungo termine e ad ampio raggio [27].

Ringraziamenti

La pubblicazione è stata realizzata con il cofinanziamento dell'Unione europea – Next Generation EU, nell'ambito del progetto di ricerca "Ecosystem for Sustainable Transition in Emilia-Romagna". Si ringrazia la Professoressa Eva Coïsson in qualità di responsabile scientifico dell'attività di ricerca illustrata nel presente contributo.

Contributo autori

Ricerca d'archivio e raccolta dati: L.L., E.Z.; Progettazione del database GIS e analisi dei dati: E.Z.; Analisi dei casi studio: L.L.; Struttura del paper: E.Z.; Scrittura del paragrafo 3: L.L.; Scrittura altri paragrafi: E.Z.

Bibliografia

[1] Bertolini P et al. Analisi degli effetti socioeconomici del sisma. In: Giovannini D, Vezzali L, a cura di. Unimore e il terremoto del 2012 in Emilia-Romagna. Interventi e ricerche per fronteggiare l'emergenza e sostenere la ripresa. Carpi: APM Ed; 2016, pp. 209-219.

[2] Blasi C. Il consolidamento dei campanili danneggiati dal sisma: riflessioni di conservazione e sicurezza. In: Di Francesco C, a cura di. A sei mesi dal sisma. Rapporto sui Beni Culturali in Emilia-Romagna. Bologna: Minerva Ed; 2014, pp. 225-238.

[3] Coïsson E, Ferrari L, Ottoni F. Bell Towers Under (Seismic) Attack: Saving a Symbol, Once It Became a Menace. In: Farnaz FA et al. Historic Cities in the Face of Disasters: Reconstruction, Recovery and Resilience of Societies, 2021, pp. 317-334.
[4] D.M. 17/01/2018. Norme Tecniche per le Costruzioni e Circolare n. 7. In: GU n. 42. 20/02/2018.
[5] Doglioni F, Moretti A, Petrini V. Le chiese e il terremoto. Dalla vulnerabilità constatata nel terremoto del Friuli al miglioramento antisismico nel restauro, verso una politica di prevenzione. Trieste: Lint; 1994.
[6] Lagomarsino S. On the vulnerability assessment of monumental buildings. Bull Earthquake Eng (2006) 4:445–463.
[7] D.P.C.M. 23/02/2006. Approvazione dei modelli per il rilevamento dei danni, a seguito di eventi calamitosi, ai beni appartenenti al patrimonio culturale. In: GU n. 55, 7/3/2006.
[8] Doglioni F. Codice di pratica (Linee Guida) per la progettazione degli interventi di riparazione, miglioramento sismico e restauro dei beni architettonici danneggiati dal terremoto umbro-marchigiano del 1997. In: Bollettino ufficiale della Regione Marche, a. XXXI, n. 15, settembre 2000, pp. 11-252
[9] Donatelli A. La ricerca nel restauro strutturale. Sicurezza sismica e consapevolezza storico-costruttiva: il nodo culturale della recente normativa. In: Di Fiorani D, Musso SF, a cura di. RICerca/RESTauro, Sezione B, Progetto e cantiere. Problematiche strutturali. Roma: Edizioni Quasar; 2017, pp. 793-803
[10] Bartolomucci C. Un restauro rinnegato: la ricostruzione della facciata della basilica di San Bernardino all'Aquila. In: ArcHistoR, X, 2023, 19, pp. 130-161.
[11] Bartolomucci C. Qualità e tempo. La conoscenza degli interventi pregressi per il progetto di restauro. In: Restauro dell'architettura. Per un progetto di qualità. Roma: Edizioni Quasar; 2023. pp. 521-529
[12] ISTAT. Archivio basi cartografiche. https://www.istat.it/it/archivio/104317 (data ultima consultazione 10/05/2024).
[13] INGV. Archivio Shakemaps. https://shakemap.ingv.it/shake4/archive.html (data ultima consultazione 13/05/2024).
[14] INGV. Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPT15). https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/ (data ultima consultazione 10/05/2024).
[15] Segretariato Regionale. WebGIS del Patrimonio dell'Emilia-Romagna. https://www.patrimonioculturale-er.it/webgis/ (data ultima consultazione 10/05/2024).
[16] Grünthal G. European macroseismic scale 1998. In: European Seismological Commission (ESC). Lussemburgo; 1998.
[17] Mezzina M., Dentamaro C. Capitolo 13: Adeguamento e miglioramento per gli edifici in muratura ordinaria. In: Braga F, a cura di. Commentario D.M. 16/01/1996 e alla Circolare n.65 del 10/04/1997 del Ministero LL. PP.. Potenza: Lamisco; 1998, pp.381-437.
[18] SABAP-BO, Fondo Sisma 2012, fasc. 035020_26 Chiesa della Santissima Annunziata, Correggio, RE
[19] SABAP-BO, Archivio Storico, fasc. REM357 Chiesa della Santissima Annunziata, Correggio, RE
[20] SABAP-BO, Archivio Storico, fasc. REM299 Chiesa di Santa Maria della Misericordia, Correggio, RE
[21] SABAP-BO, Fondo Sisma 2012, fasc. 035020_11 Chiesa di Santa Maria della Misericordia, Correggio, RE
[22] Corazza L et. Analisi delle caratteristiche tipologiche, di vulnerabilità e danno degli edifici. In: CNR, a cura di. Repertorio dei meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei relativi costi negli edifici in muratura. Ancora: Tipografia Grafiche Scarponi; 2007, pp. 45-88
[23] Canofeni G. Vulnerabilità tipica e meccanismi di danno degli edifici in aggregato. In: Bollettino Ufficiale della Regione Marche, 29 settembre 2000, anno XXXI, N. Ed. S. 15, pp. 76-77
[24] SABAP-BO, Archivio Storico, fasc. REM270 Chiesa di San Martino Vescovo, Correggio, RE
[25] SABAP-BO, Fondo Sisma 2012, fasc. 035020_A Chiesa dei San Martino Vescovo, Correggio, RE
[26] Nicolini G, Il restauro della Chiesa e ospitale di Santa Maria della Misericordia a Correggio. Analisi dello stato di fatto e ipotesi di consolidamento strutturale. Polimi: Tesi di Laurea Magistrale, A.A. 2009-2010, pp. 145

[27] Della Torre S. Conservazione programmata: la visione, le politiche, le pratiche. In: Il capitale culturale, Supplementi, 2022, 12, pp. 93-104.