



# 'ANA FKH 81.

NUOVA SERIE - MAGGIO 2017



## SISMA 2012: IL PROCESSO DI MESSA IN SICUREZZA COME STRATEGIA PER LA CONSERVAZIONE PROGRAMMATA DEL PATRIMONIO ECCLESIASTICO DELLA DIOCESI DI MANTOVA.

ANDREA ADAMI, ALESSANDRO CAMPERA, LUIGI FREGONESE, BARBARA SCALA

Introduzione

Gli effetti del sisma che nel 2012 hanno colpito Emilia Romagna e Lombardia, sono stati tanto gravi, quanto imprevisti, poiché l'area si trovava in una zona classificata a basso rischio sismico. Il terremoto ha causato danni significativi ad un'ampia gamma di immobili (edifici rurali, industriali, infrastrutture, oltre ad monumenti storici) collocati tra le province di Mantova, Modena e Ferrara fino a Bologna, con un danno stimato (in un rapporto inviato all'UE Commissione) per 13 miliardi e 273 milioni di euro. Dopo il terremoto, le attività di messa in sicurezza e di ricostruzione hanno proseguito con celerità soprattutto riguardo il patrimonio gestito direttamente dalla Diocesi di Mantova tanto che a 5 anni dal sisma si sono riaperti 115 edifici per il culto.

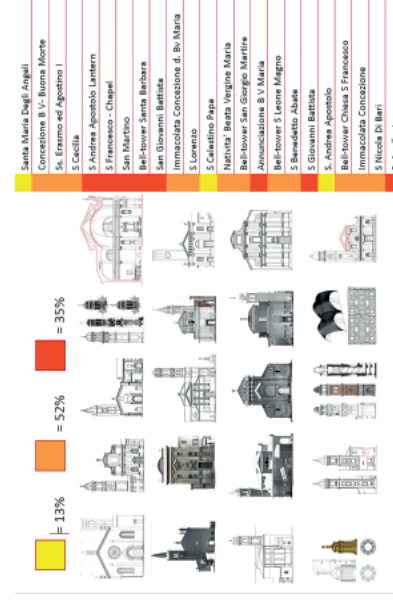
In questo "processo", il Politecnico di Milano ha partecipato attivamente occupandosi della fase conoscitiva di 25 edifici religiosi. Volutamente si utilizza il termine "processo", per descrivere l'attività svolta perché le operazioni condotte non hanno riguardato solo scelte tecnologiche operative, ma hanno interagito con tutto il percorso progettuale partendo dai sondaggi, l'analisi dei danni fino alla definizione oculata di interventi, con l'obiettivo di predisporre un modello di gestione manageriale post emergenza sismica, in fase della futura conduzione ordinaria.

La sequenza sismica ebbe inizio il 20 maggio 2012, e fu seguita da quattro eventi intensi il 29 maggio, e da una sequenza di tremori minori nei giorni successivi.

Come la bibliografia ampiamente ha documentato, gli edifici di culto presentano particolari criticità in caso di sisma. La configurazione geometrica tipica delle chiese rende poco adatte queste architetture a sopportare carichi verticali, a causa delle pareti perimetrali sottili, della

mancanza di strutture orizzontali interpiano, delle deboli o inesistenti connessioni tra elementi strutturali contigui, dell'assenza di tiranti efficaci per assorbire spinte d'arco nonché dell'irregolarità della maglia costruttiva. Questi aspetti, aggiunti alle scarse prestazioni del materiale edilizio, specialmente se sottoposto a stress di trazione, sono alcune tra le cause dei crolli strutturali degli edifici analizzati soggetti a forze sismiche.

La Diocesi di Mantova, prima di intervenire, verificò in modo dettagliato i danni da sisma al suo patrimonio. I 125 edifici danneggiati sono stati classificati come inagibili, con pericolo di crolli imminenti, inagibili parzialmente collassati, danneggiati ma senza pericolo alla sicurezza pubblica.



Individuazione delle chiese rilevate dal Politecnico di Mantova e classificazione in relazione ai danni subiti.

### 1 Il rilievo

La fase di emergenza dopo l'evento sismico, prevede la predisposizione di strutture provvisorie che, oltre alla incolumità pubblica, garantiscano la visibilità degli

ambienti danneggiati per provvedere ad una prima verifica della consistenza dei danni. Le criticità iniziali sono elevate in quanto, si possono compromettere ulteriormente le condizioni conservative, perciò è importante che sia disponibile agli operatori materiale grafico chiaro. La campagna di rilievo, svolta dal Politecnico, ha messo a disposizione documentazione utile a garantire la completa conoscenza della fabbrica, al fine di poter provvedere a successive progettualità. Nell'esecuzione dei rilievi sono emersi livelli di difficoltà operative diverse in relazione alla situazione di sicurezza post sisma in cui si trovava la chiesa alla quantità e qualità di materiale da produrre necessario all'elaborazione del progetto di consolidamento. Si sono potute individuare tre categorie operative:

1) chiese con grado di difficoltà basso: rilievo e restituzione dei disegni in una settimana in 3 operatori (Sarginesco, Angeli e Pietole). Il rilievo è stato eseguito in modo speditivo, favoriti dalla configurazione architettonica degli edifici ad ambiente unico o centrale, la presenza di un quadro fessurativo concentrato in punti strutturali chiave e ben documentabili con dato laser scanner. Per ogni caso sono state effettuate 16 scansioni laser (risoluzione media 3,1 mm a 10m – 6 min circa) con rete topografica di inquadramento. Gli elaborati prodotti sono sezioni architettoniche 2D classiche con proiezione ortogonale del dato laser scanner come sfondo su cui lavorare per estrarre gli andamenti delle fessurazioni, i distacchi, i degradi.

2) chiese con grado di difficoltà medio: rilievo con 3/4 operatori in 1/2 giorni con rete topografica di inquadramento; tempo di restituzione 30 giorni circa.

Oltre le ordinarie rappresentazioni 2D si è garantito l'elaborazione di un database 3D che ha permesso di estrarre informazioni fondamentali sullo stato di danno delle strutture, (fuori piombo, curvatura delle volte e degli archi, distacchi tra elementi murari e strutture orizzontali, fessurazioni principali, deformazioni). Le chiese di questa categoria hanno richiesto un grado di approfondimento maggiore per geometrie, dimensioni architettoniche e

apparati decorativi più complessi. È stato necessario acquisire una quantità di scansioni rilevante per ottenere il giusto livello di risoluzione e ricoprimento complessivo (in media 32 scansioni tra interno ed esterno compreso, ove possibile i sottotetti – risoluzione media 3,1 mm a 10 m).

3) chiese con grado di difficoltà alto: rilievo con 5 operatori in 2 giorni di acquisizione; tempi di restituzione 40 giorni circa. La complessità ed importanza delle architetture di questo gruppo, unita agli aspetti logistici legati ai crolli e ai danni riportati dopo gli eventi sismici, hanno implicato tempi lunghi per il coordinamento tra le autorità e soggetti coinvolti e un'accurata progettazione del rilievo. In tutti questi casi la Protezione Civile è intervenuta sulle facciate e sulle coperture per evitare crolli verso gli spazi pubblici esterni, mentre all'interno non sono stati eseguiti puntellamenti.

Le chiese sono caratterizzate da decorazioni, affreschi e geometrie complesse. In alcuni casi, come per il campanile della chiesa di Santa Barbara o la lanterna della cupola della Basilica di S. Andrea a Mantova, il rilievo ha dovuto tenere conto dell'estensione verticale delle strutture (h= 53mt-73mt) e della densità dell'antico contesto urbano, che ha reso difficile trovare buone posizioni a terra per acquisire le misure (sia come angoli di misura che risoluzione uniforme del dato sulla superficie da rilevare). Il rilievo laser scanning è stato integrato da un rilievo fotogrammetrico 3D, da terra e dall'alto, elaborato con il metodo del dense image matching, DSM e la modellazione automatica da immagini (automated 3D image modeling). Recenti studi hanno mostrato i buoni risultati dall'integrazione tra image-matching nel rilievo architettonico e close-range, confrontati con il dato laser scanning. Questo approccio è stato indispensabile soprattutto nelle parti di edifici inaccessibili con metodi "tradizionali", poiché ha permesso di estrarre dalle immagini, nuvole di punti per la restituzione delle geometrie. Dall'elaborazione di ortofoto o di texture proiettate metricamente sul modello 3d, sono state ricavate le informazioni relative a danni e lesioni presenti.

La restituzione del dato di colore (RGB) si è dimostrato utile per la documentazione di affreschi, decorazioni, elementi di arredo, altari in pietre e marmi. Il problema causato dall'assenza o scarsa illuminazione interna è stato superato con l'utilizzo di un pallone illuminante a luce uniforme (pallone di Airstar, modello Sirocco 575W hmi, hot restrike, con perfica a 6 mt e ballast interno) laddove è stato possibile portare collegamenti elettrici. Negli altri casi si è cercato di sfruttare l'illuminazione naturale, lavorando in post-produzione sulla gestione del colore e dell'esposizione delle immagini per la loro mosaicatura. Nei siti con edifici a rischio di crolli localizzati, (Chiesa di S. Giovanni del Dosso), si è deciso di documentare il dato del colore attraverso l'acquisizione automatica di panorami sferici ad alta risoluzione (24540x12270 pxls a 300dpi, 24 bit di profondità) dagli stessi punti di presa delle scansioni laser scanner, con testa motorizzata CLAUS Rodeon VR per il controllo della camera digitale. Il dato RGB è stato orientato ed associato ai punti delle nuvole laser, rilevate ad alta densità (1,6mm a 10mt – 13 min circa). Da queste ultime sono state estratte le immagini del dato proiettato sui piani di riferimento delle sezioni principali per la restituzione degli sfondati architettonici alla scala grafica 1:50, utilizzando il software per la visualizzazione di nuvole di punti dense, Pointools di Bentley. I modelli fotogrammetrici elaborati con il dense image matching sono stati ottenuti utilizzando il software Agisoft Photoscan. Le immagini sono state allineate e il modello ottenuto è stato scalato e roto-traslato nel sistema di riferimento topografico locale, consentendo l'integrazione e il confronto con i dati laser scanning. La camera digitale impiegata nei rilievi da terra e da piattaforma aerea (rilievo della copertura della chiesa di S. Apollonia a Mantova) è stata Canon Eos 5D Mark III con lenti a 24 e 35mm. con sensore ad alta risoluzione (22MPx). I rilievi aerei invece sono stati eseguiti, per i due casi citati della lanterna di S. Andrea e la torre campanaria di S. Barbara, con una piattaforma UAV formata da un optocottero equipaggiato con camera digitale Canon Eos

650D da 18Mpxl, 2 giroscopi per il controllo del volo, GPS e altimetro barometrico. Queste acquisizioni sono state progettate per ottenere risoluzioni e precisioni adeguate per restituzioni in scala grafica 1:50 e 1:20, al fine di consentire un'analisi approfondita dello stato di fatto degli edifici studiati. Oltre alle restituzioni grafiche 2D complete di tutto l'edificio, sono stati elaborati modelli tridimensionali sia per applicazioni BIM che analisi strutturali. In questi casi il dato tridimensionale, laser scanning o fotogrammetrico, è essenziale per la modellazione degli elementi architettonici, partendo dalla forma reale di ciascuno dopo i danni e i dissestamenti dovuti al sisma, per uno studio ed un'analisi realistica del comportamento complessivo dell'edificio.

## 2. Il progetto di conservazione

Le attività operative proposte dopo l'indagine geometrica hanno assecondato un approccio volto all'uso di tecnologie e materiali legati al contesto, assecondando la definizione di miglioramento sismico che mira ad accogliere un aumento della sicurezza globale senza modificare l'idea costruttiva del manufatto. Il raggiungimento di questo obiettivo è stato garantito dall'indagine architettonica consegnata, che ha fornito non solo la geometria, ma anche la situazione delle instabilità attive. In particolare, con riferimento ai meccanismi di danno sismico (Papa 2013) si è verificato come essi erano diffusi in molte chiese. I meccanismi più comuni individuati sono il ribaltamento della facciata (1), il collasso del timpano (2), la formazione di lesioni nel piano di facciata (3) e nelle pareti laterali (6), movimenti delle colonne (7), danni nelle volte centrali, laterali, del transetto e nell'abside (8,9,12,18), il ribaltamento delle pareti del transetto (10) e la formazione di cerniere negli archi trionfali (13), fessure nell'abside (17), movimenti nelle coperture (19, 20, 21), e interazioni distruttive con i corpi adiacenti irregolari (25), cadute di aggetti (26) e problematiche alla torre e cella campanaria (27,28). Attraverso la lettura dei meccanismi di danno, è emerso come la vulnerabilità del patrimonio ecclesiasifico mantovano sia stata legata alla

manca di legami in copertura e connessioni a quote basse, oltre la modesta qualità delle murature. Dai numerosi materiali documentari raccolti si sono individuate le linee operative principali proposte in fase progettuale e poi eseguite in cantiere.

### 2.1. Interventi in copertura

Le coperture sono le strutture il cui stato conservativo ha condizionato l'ampiezza dei danni proporzionalmente al loro stato manutentivo. Accanto a problemi strutturali, si sono registrati danneggiamenti alle parti architettoniche. Le situazioni riscontrate hanno suggerito di affrontare il problema alle coperture in modo completo, aprendo il tetto, rimuovendone il manto e l'orditura al fine di realizzare un bordo perimetrale di "muratura rinforzata". Si sono collegate le pareti longitudinali in modo flessibile ma resistente ed "agganciato", se necessario, la facciata e l'abside. I cordoli in muratura hanno evidenziato tre vantaggi statici fondamentali: assorbire le sollecitazioni assiali ripartendole sulle murature d'imposta; ripartire i carichi concentrati verticali in modo da agevolarne la diffusione nella muratura sottostante; contrastare i pericolosi meccanismi di danno fuori del piano. Nei casi indagati il cordolo murario ha assolto la funzione di ripartizione anche di carichi verticali, (creando le condizioni per una reciproca collaborazione fra le murature) e permesso di contrastare il ribaltamento delle pareti fuori del piano, grazie alla sua flessibilità che ha assicurato una continua aderenza con la muratura anche in condizioni dinamiche. Il rinforzo a livello sommitale è stato ottenuto con la posa, tra gli ultimi corsi di mattoni, di un tessuto unidirezionale in fibra d'acciaio impregnato di betoncino strutturale di calce. L'omogeneità del nuovo profilo murario ha permesso di collocare travetti e assito in modo da garantire un comportamento lineare del tetto, ulteriormente irrigidito da pannelli di multistrato fenolici, fissati, con viti autofilettanti, ai travetti per tutto lo spessore di quest'ultimi, e collegati uno all'altro con l'utilizzo di nastri forati (80x2,0 mm) in acciaio e viti

Il completamento della copertura è avvenuto attraverso il suo fissaggio alla muratura tramite barre verticali in acciaio inox filettate o fittoni metallici, ed il collegamento delle travi lignee del colmo tramite piastre in acciaio. All'estradosso dell'assito è stato posato un doppio strato di guaine bituminose, il manto in coppi fissati con ganci ferma coppo.

### 2.2 Murature in elevato

Le murature perimetrali sono state garantite nella tenuta tramite la posa di tiranti in acciaio. Le soluzioni adottate nelle diverse chiese hanno aspetti comuni: si è condiviso l'utilizzo di catene a sezione rettangolare (piatto 100x10mm) che partono dall'esterno delle murature e continuano nascoste sopra le cornici interne di navate e facciate. In base al disegno del fronte, si sono scelti diversi ancoraggi: bolzoni e/o piastre in acciaio nascosti sotto intonaco o terminali a radice. Con frequenza, si sono utilizzati anche "trefoli a basso rilassamento" a più fili. Interessanti sono stati i casi in cui ci si è trovati di fronte alla possibilità del raddrizzamento delle facciate dopo averle garantite dal collasso completo. Il ripristino del fuori piombo e l'eliminazione del distacco dalle murature longitudinali della navata principale ha richiesto un controllo meticoloso delle connessioni murarie anche nei minimi spostamenti durante la fase di movimentazione (rotazione) e ricollocazione della facciata nella posizione originaria. La sequenza procedurale è partita dallo smontaggio della copertura, a seguito della quale si è provveduto alla pulitura delle lesioni in modo da eliminare ostacoli e elementi di attrito/contrasto al movimento rotatorio del muro. Come supporto della facciata è stata posta in opera una struttura provvisoria in tubi-giunto, realizzata subito dopo il sisma per impedire crolli, che dotata di rinforzi è stata usata per la ripartizione e la trasmissione del tiro. In particolare sono state rinforzate, con raddoppio dei profili tubolari, le aree maggiormente sollecitate. In favore di sicurezza sono state posizionate piastre in acciaio ancorate sull'angolo tra le murature longitudinali della navata centrale ed il muro trasversale del

fondo navata, necessarie a dare contrasto all'azione di tiro. Cavi in acciaio (interni ed esterni) e un sistema di martinetti collegati ad una centralina elettrica, hanno avuto il compito di monitorare il tiro per garantire uno sforzo uniforme sulla struttura, mentre i fessurimetri hanno verificato l'efficacia dell'azione. La rotazione della facciata, facendo perno sulla base, è stata eseguita azionando in modo lento i martinetti fino a recuperare progressivamente frazioni alla deformazione. Il paramento murario è stato bloccato in corrispondenza della cornice interna alla navata.

A seguito della messa in pristino del fronte è stato necessario garantirlo staticamente ricucendo le lesioni in corrispondenza dell'attacco della muratura frontale con le longitudinali.

Un sistema di cucitura utilizzato con frequenza, è quello con barre elicoidali collocate in corrispondenza del contatto tra la muratura delle pareti e gli archi in muro pieno. Le barre sono state posate a secco, orientate in modo incrociato per collegare i paramenti.

L'azione di legatura è stata affidata anche a catene poste in opera con sezione rettangolare nella parte a vista, circolare nella zona interna alla muratura, opportunamente saldate. Le ricuciture delle lesioni sono state eseguite con una sequenza operativa ampiamente verificata consistente, nei casi più gravi, nella preventiva loro chiusura con operazioni di ricostruzione localizzata della tessitura muraria in mattoni pieni, oppure con cucitura armata utilizzando barre ad aderenza migliorata immerse in una boiacca fluida; nell'inserimento

di cunei di legno duro e/o ferro e malta con colature di miscela legante costituita da calce, sabbia fine o polvere di marmo o con altri prodotti leganti compatibili. Difficoltà di esecuzione sono sorte quando ci si trovava di fronte a lesioni molto ampie e la tessitura muraria era particolarmente frammentata e disomogenea.

### 2.3 Le volte

Frequentemente le volte sono costituite da centine lignee che sostengono un graticcio di listelli di legno ai quali è stato applicato lo strato di intonaco di finitura. In molti casi tali strutture sono crollate e per la loro riparazione era necessario un ponteggio per le lavorazioni a soffitto, e piani di lavoro per operare all'estradosso. Strutturalmente si è proceduto al consolidamento delle centine con carenze strutturali e/o gravi ammaloramenti, affiancando le centine esistenti con elementi lignei chiodati. Nelle zone ove l'intonaco si era completamente distaccato si è proceduto alla ricostruzione con malte di calce, mentre se il canniccio è venuto meno si è applicato un strato di armatura (juta), fissata con collanti, accavallata alle centine in modo da creare un corpo unico. Barre di ottone con anelli in acciaio sono stati posti tra la camorcanna e l'armatura per ricreare punti di aggancio e appensione.

Nel caso di volte costituite da mattoni in foglio si sono eseguite preliminarmente operazioni di ricucitura e intasamento delle connessioni e quindi sull'estradosso si sono collocate fasciature strutturali di tessuto in fibra di carbonio.

Le volte murarie interessate da lesioni di ampiezza contenuta hanno visto l'intagliamento delle fessure, dopo la pulizia dei lembi, la rimozione delle porzioni di intonaco pericolanti, l'inserimento di cunei in acciaio e malta di calce idraulica per completare la cucitura.

Un secondo tipo di intervento è stato la posa di una cappa armata a base di calce idraulica naturale mescolata ad inerti leggeri. Dopo aver svuotato il rinfiacco e rimosso la caldana storica (se presente) in gesso, si sono scarnificate



Chiesa di Poggio Rusco.



Collegamento della facciata alla navata

le connessioni, pulito la superficie, e applicato la rete elettrosaldata ancorata alla volta con connettori in acciaio ad aderenza migliorata, inseriti in fori fissati con resina epossidica. La chiusura di lesioni di tipo passante è avvenuta anche tramite l'inserimento di cunei in acciaio e malta di calce idraulica.

Obiettivo degli interventi sugli archi in muratura era quello di garantirne l'irrigidimento. Si è solitamente provveduto alla posa di barre ad aderenza migliorata collegate all'arco tramite staffe estradossali, calandrate e rese collaboranti tramite un getto a base di calce.

### 3 Conclusioni

Dalla esperienza della Diocesi di Mantova è emerso come sia stato importante attivare un coordinamento di carattere sovra-locale nella gestione degli interventi nelle numerose chiese. È emerso anche come nelle scelte legate alla priorità operativa e alla salvaguardia dei manufatti sia stato importante rispondere alle necessità di carattere materiale e di carattere antropologico sociale, garantendo la conservazione non solo della cultura materiale ma anche dei significati simbolici intangibili che contribuiscono alla connessione della comunità locale, suscitando interesse e affezione, sentimenti necessari per prendersi cura del costruito esistente. La programmazione delle attività ha permesso di pianificare in modo sistematico gli interventi, indirizzare le risorse in relazione alla reale situazione conservativa e le esigenze di uso, ottimizzare le tempistiche operative al fine di monitorare i danni, ed infine concentrare le esperienze di riparazione. Dal materiale fornito dalla Diocesi si è evidenziato come vi sia stata un'evoluzione nelle tecniche di riparazione rispetto le procedure attivate dopo il terremoto del 1997 in Umbria, che stimolò una maggiore attenzione agli aspetti costruttivi tradizionali, promuovendo attività di ricerca relativa a soluzioni tecnologiche appartenenti alla cultura sismica locale. Purtroppo è emerso anche come le operazioni proposte nei progetti appartengono ad un bagaglio

formativo che abitualmente non è proprio dei professionisti. Frequentemente architetti e ingegneri acquisiscono la conoscenza di soluzioni progettuali solo dopo essersi scontrati con i pareri negativi degli enti di tutela all'atto dell'approvazione del progetto. L'appropriazione delle conoscenze riguardanti tecniche di riparazione da utilizzare nei beni culturali sono ottenute quando è conclusa la formazione dello studente universitario ed è trasmessa ai professionisti da personale il cui compito non è quello di educare ma verificare che tutti gli aspetti della tutela siano assolti in modo esaustivo e corretto. Questo gap formativo non è presente per la prima fase di approccio al costruito, ovvero riguardo la conoscenza preliminare, rilievo, indagini conoscitive ecc. dove la tecnologia ha raggiunto livelli elevati e abitualmente le si riconosce il ruolo strategico.

C. Achille, A. Adami, S. Chiarini, S. Cremonesi, F. Fassi, L. Fregonese, L. Taffuelli, *UAV-Based Photogrammetry and Integrated Technologies for Architectural Applications—Methodological Strategies for the After-Quake Survey of Vertical Structures in Mantua (Italy)*, in: *Sensors 2015*, 15(7), pp.15520-15539, 2015.

C. Achille, A. Adami, F. Fassi, L. Fregonese, A. Spezzani, L. Taffuelli, *BIM: an integrated model for planned and preventive maintenance of Architectural Heritage*, in: *Proceedings of 2nd International Congress on Digital Heritage 2015*, Granada, Spain 2015.

A. Adami, S. Chiarini, S. Cremonesi, L. Fregonese, L. Taffuelli, M. V. Valente, *The survey of cultural heritage after an earthquake: the case of Emilia-Lombardia*, In *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XII-B5, 161-168, doi:10.5194/isprs-archives-XII-B5-161, 2016.

G. Castellazzi, C. Gentilini, L. Nobile, 2013, *Seismic Vulnerability Assessment of a Historical Church: Limit Analysis and Nonlinear Finite Element Analysis*, *Advances in Civil Engineering*, vol. 2013, Article ID 517454, 12 pages, 2013. doi:10.1155/2013/517454

S. Della Torre, 2016, *Terremoto e prevenzione*, in *Ananke*, 79, 5-8, 2016.

C. Modena, F. Casarini, F. Da Porto, M. Munari, E. Simonato, *Cultural Heritage Buildings and the Abruzzo Earthquake: performance and post-earthquake actions*, *Advanced Materials Research*, Vol.133-134, pp 3-17, *TransTech publications*, Switzerland, 2010

S. Papa, G. Di Pasquale, *Manuale per la compilazione della scheda per il rilievo del danno ai beni culturali*, Chiesa Modello A - Dc. 2013

Technical reports provided by the Diocese of Mantua, draft for internal use, 2012-2017.

Regione Lombardia, 2016, *Rapporto circa lo stato della ricostruzione al 31 dicembre 2016*, Milano, 31 dicembre 2016.

R. De Marco, C. Eva *Manuale per la compilazione della scheda di 1° livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza post-sismica*, AeDES, 2009.