

La (perduta) memoria del terremoto: un confronto tra i danni prodotti dal sisma del 1987 e del 2012 su alcune chiese dell'Emilia

The earthquake (lost) memory: a comparison between the seismic damage occurred in 1987 and 2012 on several churches of Emilia

Stefano Podestà¹, Sonia Parodi², Lorenzo Scandolo³, Laura Moro⁴ ■

Sommario

Gli effetti traumatici che si susseguono dopo ogni evento sismico fanno emergere con assoluta chiarezza quanto sia vulnerabile il nostro costruito esistente. Alle costruzioni storiche, più o meno antiche, realizzate senza il rispetto di criteri che tengono conto della pericolosità sismica del sito – criteri imposti oggi dalla Normativa o governati dalle regole dell'arte nel passato – si aggiunge la continua constatazione dell'inadeguatezza degli strumenti che utilizziamo per cautelarci dal rischio sismico. L'evoluzione dell'ingegneria sismica è d'altronde basata, in maniera quasi duale, sugli eventi più o meno importanti che si sono verificati nel mondo industrializzato, alimentando la ricerca della comunità scientifica. Ogni evento, infatti, rappresenta un test che permette di valutare la bontà dei modelli di calcolo, delle soluzioni tecniche, permettendo di proporre di nuovi quando i risultati non sono stati congruenti a quanto teoricamente preventivato. Fa parte ovviamente del consueto sviluppo della ricerca che ha l'obbligo di stare sulla frontiera della conoscenza, modificare i metodi di verifica, aggiornare i parametri che entrano in gioco. Più complessa è però l'applicazione sulle costruzioni, monumentali e non. Gli interventi che progettiamo sono episodi che condizionano il comportamento strutturale (la risposta sismica) per un lasso temporale molto lungo, che male si coniuga con gli aggiornamenti normativi che la ricerca accademica può determinare. Le motivazioni sono abbastanza ovvie: da un lato la difficoltà a traghettare sul mondo professionale i risultati della ricerca rende lento questo aggiornamento continuo, dall'altro le disponibilità economiche limitate, completamente assorbite per gestire l'emergenza del momento non consentono di pianificare in termini preventivi una riduzione del rischio sismico.

In questo panorama l'evento dell'Emilia rappresenta una situazione emblematica. L'azione sismica che si è verificata sia in termini di accelerazione massima sia come contenuto in frequenza evidenzia un evento con una probabilità di eccedenza minore di quella presa normalmente come riferimento per lo stato limite di salvaguardia della vita. La ridotta profondità dell'evento sismico ha determinato accelerazioni verticali comparabili a quelle orizzontali. Valori così elevati della componente sussultoria, sottolineano la necessità di una diversa interpretazione del loro effetto in termini di spettro di risposta, rispetto a quanto ad oggi normato. Si fa ad esempio riferimento all'invariabilità degli spettri verticali previsti dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14 gennaio 2008) per le diverse classi del sottosuolo. Da questo punto di vista la possibilità di cautelarsi preventivamente può sembrare quasi inutile, consci delle conoscenze in nostro possesso. In questo lavoro, invece, si è provato a dimostrare tramite lo studio di alcuni manufatti storici, come sia possibile operare in un'ottica preventiva, cercando di capire come anche la "limitata conoscenza" attuale sul fenomeno terremoto avrebbe potuto salvaguardare molte costruzioni, oggi irrimediabilmente compromesse.

Lo stato di danneggiamento oggi rilevabile sulle costruzioni monumentali emiliane non può unicamente essere imputato ad una non esaustiva conoscenza della pericolosità sismica di quelle zone: la totale mancanza di agire in un'ottica culturale di prevenzione è, ancora una volta, la prima causa della perdita nostro patrimonio culturale.

Parole chiave: Vulnerabilità sismica, Analisi cinematica, Patrimonio monumentale

¹ Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA), Università di Genova - stefano.podesta@unige.it

² Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA), Università di Genova - sonia.parodi@unige.it

³ Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA), Università di Genova - lorenzo.scandolo@unige.it

⁴ Direttore dell'Istituto Centrale del Catalogo e della Documentazione del Ministero dei Beni e delle Attività Culturali (ICCD)

Abstract

The negative effects that follow each seismic event show very clearly the high vulnerability of our existing buildings. To historic buildings built without earthquake design criteria – criteria at present imposed by the Technical rules or governed by “rules of thumbs” in the past – the inadequacy of the tools used to mitigate the risk of earthquakes is added. The development of earthquake engineering is based on the other hand on the important events that have occurred in the industrialized world, fueling the scientific community research.

In fact, each event evaluates the effectiveness of computational models and technical solutions, proposing new ones when the results were not congruent with the expected results. The development of the research require to be on the boundary of knowledge, changing the methods of verification, updating the main parameters. However, more complicated is the application on ordinary buildings and even more so on monumental buildings. The retrofits designed affects the structural behaviour (the seismic response) for a very long time and this aspect is not compatible with updates that the academic research may achieve. The reasons are quite obvious: on the one hand the continuous updates gather for research are difficult to convey on the professional world in a fast way, on the other hand the limited budget are completely absorbed by the emergency of the moment and does not allow to plan a pre-emptively reduction of seismic risk.

In this context the event happened in Emilia represent an emblematic situation. The seismic action that occurred in terms of maximum acceleration and frequency content, highlights an event with a probability of exceedance less than that normally use for the limit state of preservation of life. The shallow depth of the epicentre caused vertical accelerations comparable to the horizontal. These high values of the sussultatory component emphasize the need for a different interpretation of their effect in terms of response spectrum, as recommended by Technical Rules.

An example is the influential of subsoil classes in vertical response spectra provided by the Technical Rules for Construction (D.M. January 14, 2008). From this point of view, the preventative intervention may seem useless, caused by the non-exhaustive level of knowledge. Nevertheless in this work the authors have tried to show how it can be possible operate in preventive perspective, through the study of some historical buildings. Although with the awareness of “limited knowledge” on the earthquake, the preservation of many building could be carry out, avoiding their destruction. The damage detected on the monumental buildings in Emilia can not only be attributed to a non-exhaustive knowledge of seismic hazard: the lack of a cultural perspective of prevention is, once again, the first cause of loss of our cultural heritage.

Keywords: Seismic vulnerability, Kinematic analysis, Cultural heritage

1. Introduzione

La vulnerabilità sismica del costruito monumentale rappresenta un tema di primario interesse soprattutto in un territorio, come quello italiano, caratterizzato da una pericolosità significativa e dalla rilevanza del patrimonio esposto.

Sulla base di tali considerazioni e sulla necessità di definire un idoneo strumento di prevenzione, sono state redatte dal Ministero per i Beni e le Attività Culturali in collaborazione con il Dipartimento della Protezione Civile, le Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale (Direttiva P.C.M. 9 febbraio 2011, Gazzetta Ufficiale n. 47 del 26 febbraio 2011 - Supplemento ordinario n. 54). Le Linee Guida costituiscono un valido strumento per attuare la prevenzione del patrimonio monumentale, dal momento che i criteri di verifica e le indicazioni in esse contenute fanno riferimento alle peculiarità proprie del patrimonio monumentale esistente. Il percorso di conoscenza del manufatto, inteso come

l'iter conoscitivo necessario a comprenderne e interpretarne la storia costruttiva, assume un ruolo fondamentale non solo al fine di verificare la sicurezza sismica ma anche per definire al meglio gli eventuali interventi di miglioramento. Queste considerazioni, seppur valide in generale con riferimento al costruito esistente, assumono ancora più importanza se si fa riferimento ai beni monumentali, la cui storia costruttiva può essere complessa e legata a numerose trasformazioni e avvenimenti che possono aver interessato la struttura nel tempo.

Sul tema della prevenzione del rischio sismico l'attenzione deve quindi essere necessariamente posta non solo ad una corretta caratterizzazione della pericolosità sismica ma anche a un'approfondita conoscenza dei manufatti. Se l'occorrenza di un evento sismico non è infatti preventivabile se non in termini statistici, le caratteristiche strutturali degli elementi esposti rappresentano gli unici elementi che possono essere identificati in via deterministica. Per

alcune tipologie di manufatti si è raggiunta, inoltre, un'approfondita conoscenza dei possibili elementi di vulnerabilità e presidi antisismici che possono influenzare in maniera significativa il comportamento sismico atteso. In particolare per le chiese, i diversi rilievi di vulnerabilità e danno, eseguiti in seguito agli eventi sismici, costituiscono un'esaustiva banca dati non solo delle più frequenti modalità di danneggiamento che si possono evidenziare, ma anche dell'efficacia dei presidi o indicatori di vulnerabilità presenti. Tuttavia, tale conoscenza, tanto più preziosa in quanto determinatasi in una situazione comunque distruttiva come quella di un terremoto, viene spesso ignorata, perdendo così la possibilità di ragionare in termini di prevenzione (miglioramento strutturale) ma solo ed esclusivamente di riparazione del danno. E le chiese dell'Emilia non hanno fatto eccezione.

2. La vulnerabilità sismica delle chiese e la correlazione con il danno osservato

Il danno osservato dopo un evento sismico ha più volte messo in luce come determinate tipologie di manufatti siano altamente vulnerabili a questo tipo di azione. Tra i beni monumentali, le chiese rivestono un ruolo di primaria importanza: la loro elevata vulnerabilità si manifesta non solo a seguito di terremoti di rilevante intensità, come quelli che hanno interessato il Friuli nel 1976, l'Umbria e le Marche nel 1997, l'Abruzzo nel 2009, ma anche in conseguenza a fenomeni di minore entità quali ad esempio i terremoti del Reggiano del 2000, del Piemonte del 2003, del Garda del 2004. L'elevata propensione al danneggiamento di questa tipologia di manufatti, se correlato all'elevato numero di chiese presenti sul territorio italiano, evidenzia come affrontare il problema del rischio sismico di questa particolare tipologia edilizia sia una problematica di grande attualità e importanza. La particolare conformazione architettonica delle chiese, le loro caratteristiche costruttive ricorrenti,

permettono in molti casi, di rendere maggiormente prevedibile, in confronto ad altre tipologie di beni monumentali, il comportamento nei confronti dell'azione sismica. La mancanza di orizzontamenti intermedi, la presenza di pareti con elevata snellezza e di elementi spingenti quali coperture o volte, sono alcune delle peculiarità costruttive che favoriscono un comportamento per parti legato alla formazione di cinematismi locali di collasso. Questo tipo di comportamento è stato riconosciuto già a partire dall'evento sismico del 1976 (Friuli) in seguito al quale sono state predisposte le prime schede di rilievo del danno sismico, basate proprio sulla lettura del comportamento delle diverse porzioni costruttive (macroelementi) che compongono una chiesa (Daglioni et al., 1994). A partire da questo evento, il sistematico rilievo del danno alle chiese, ha permesso nel tempo di definire una solida casistica dei più probabili meccanismi di collasso che possono interessare i vari macroelementi (Figura 1). Il rilievo del danno è stato, inoltre, affiancato da un rilievo della vulnerabilità associata all'attivazione dei diversi meccanismi già a partire dall'evento sismico dell'Umbria e Marche del 1997 (Lagomarsino e Podestà, 2004).

Le metodologie predisposte a livello sperimentale sono state poi recepite a livello normativo in due schede: la scheda di rilievo del danno (Modello A-DC, Decreto del Ministro dei Beni e le Attività Culturali del 23 febbraio 2006, G.U. 7 marzo 2006, n. 55) e la scheda di rilievo della vulnerabilità (Allegato C - Direttiva P.C.M. 9 febbraio 2011, Gazzetta Ufficiale n. 47 del 26 febbraio 2011 - Supplemento ordinario n. 54); la prima è stata poi applicata nei rilievi di agibilità post sismici in Abruzzo (2009) e Pianura Padana (2012).

I rilievi del danno effettuati in passato rappresentano una fonte preziosa di informazioni di cui non sono sfruttate totalmente le potenzialità. Anche il solo rilievo del danno contiene, infatti, una implicita valutazione della vulnerabilità, anche se non esaustiva; l'attivazione di un

Figura 1
Esempi di meccanismi di danno tipici per le chiese:
a) Santa Chiara a L'Aquila, frazione Paganica: ribaltamento della sommità della facciata;
b) San Biagio d'Amiternum a L'Aquila, ribaltamento della sommità della facciata;
c) Santa Maria del Fossale a Gemona: ribaltamento facciata.



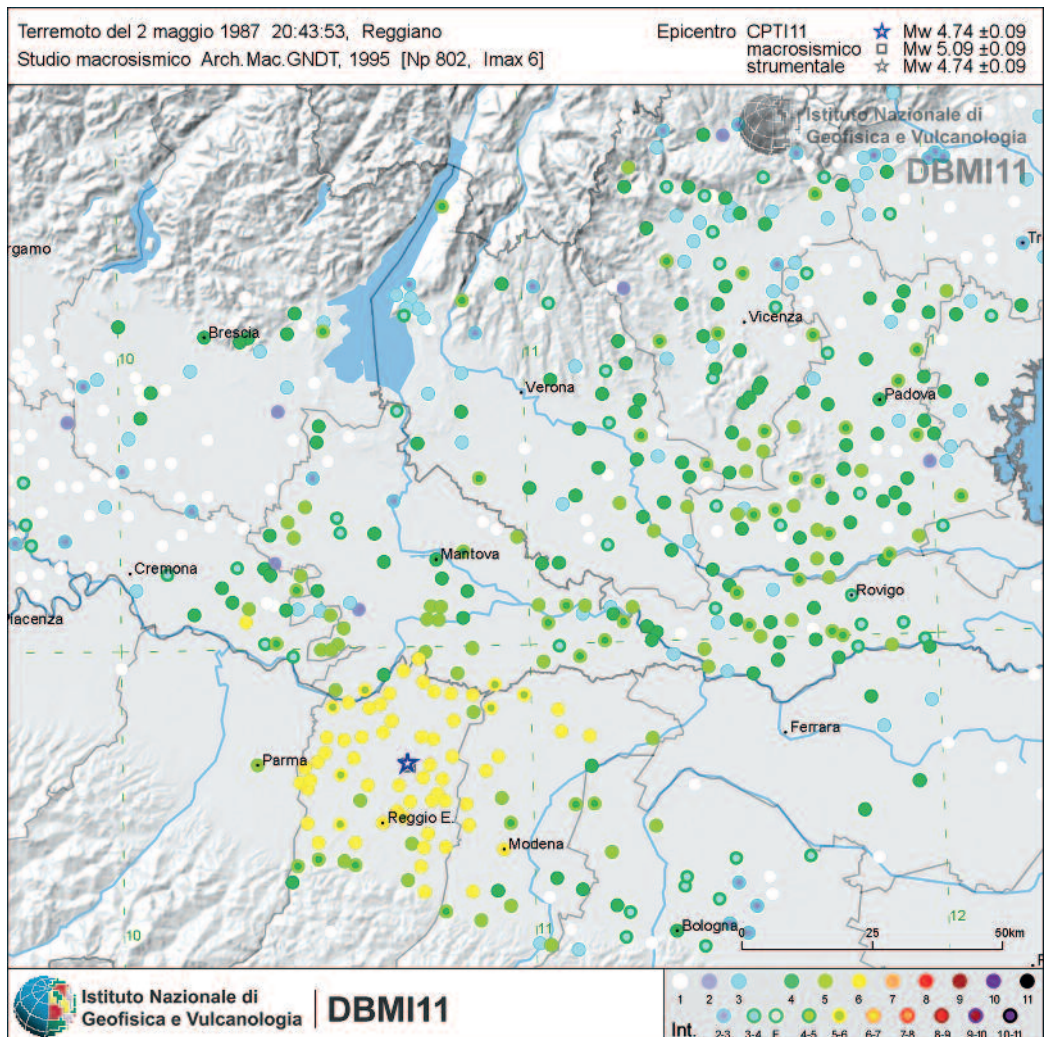
determinato meccanismo di danno rappresenta, infatti, una constatazione della vulnerabilità legata a quel particolare tipo di comportamento. Il danno che si manifesta è certamente legato alle particolari caratteristiche dell'evento sismico che si verifica (direzionalità dell'azione, intensità dell'evento, contenuti spettrali, fenomeni di amplificazione locale, componente verticale, ecc), ma allo stesso tempo è fortemente condizionato dalle caratteristiche costruttive del manufatto. Lo studio della vulnerabilità intrinseca del corpo di fabbrica diventa pertanto prioritario; in primo luogo perché l'osservazione dei danni causati da terremoti diversi ha permesso, come già accennato, di riconoscere comportamenti analoghi per strutture sollecitate da eventi differenti. In secondo luogo, l'edificio rappresenta l'unico dato che tende ad essere deterministico; una conoscenza esaustiva del manufatto (attraverso lo studio delle sue trasformazioni, dei dettagli costruttivi, di una campagna diagnostica affidabile) può, infatti, limitare l'incertezza che caratterizza ogni parametro necessario all'analisi strutturale.

3. Evento sismico del 1987

Nel 1987 le Province di Modena e Reggio Emilia sono state interessate da un evento sismico con epicentro nel comune di Novellara (Lat.44.801; Lon. 10.694) e caratterizzato da una magnitudo $M_w=4.74$ (<http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>) (Figura 2).

Seppur caratterizzato da un'intensità non particolarmente significativa, il sisma ha prodotto un danneggiamento rilevante in molte costruzioni storiche e monumentali e in particolare nelle chiese (*Archivio delle chiese danneggiate dal terremoto del 1987 - Province di Modena e Reggio Emilia*). Come già in parte sottolineato, sono proprio gli eventi sismici caratterizzati da intensità modeste ad aver messo in evidenza l'elevata vulnerabilità delle costruzioni storiche. Se terremoti violenti causano, infatti, un danneggiamento diffuso in tutte le tipologie di manufatti, specie se prive di criteri di progettazione antisismica, terremoti di modesta entità hanno la peculiarità di evidenziare le tipologie maggiormente vulnerabili. In seguito al verificarsi dell'evento del 1987, il danno nelle chiese apparte-

Figura 2
Risentimenti macrosismici
dell'evento del 2 maggio
1987 (Database
Macrosimico Italiano,
DBMI11,
<http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>).





nenti alla zona di risentimento è stato raccolto nell'Archivio delle chiese danneggiate dal terremoto del 1987 – Provincie di Modena e Reggio Emilia – redatto da un gruppo di lavoro coordinato dal prof. Vincenzo Petrini per il GNDT, tramite l'adozione di una scheda di rilievo basata sull'esperienza friulana messa a punto in seguito all'evento sismico del 1976. Il Database contiene informazioni su 102 chiese delle provincie di Modena e Reggio Emilia.

La scheda era stata predisposta con l'intento di raccogliere nella forma più completa possibile l'insieme dei dati geometrici, strutturali e di dissesto utili per le successive valutazioni di vulnerabilità e danno (Doglioni et al., 1994). Tale scheda, molto dettagliata sia nella parte di descrizione del manufatto sia nel rilievo del danno, era composta da diverse sezioni nelle quali venivano raccolti sia dati di tipo metrico, geometrico e tipologici, sia dati in forma grafica (Figura 3). Ai fini della schedatura la chiesa era pensata come suddivisibile in singole parti strutturalmente, spazialmente e funzionalmente individuabili (*elementi costruttivi*: aula, abside,

navata, ecc.). Era presente una sezione preliminare nella quale erano raccolti i dati generali della chiesa e delle sezioni specifiche per ciascun *elemento costruttivo* in numero variabile a seconda delle dimensioni e delle caratteristiche tipologiche del bene. La scheda era correlata da una parte grafica contenente il rilievo della chiesa e l'individuazione delle caratteristiche costruttive principali e dello stato fessurativo rilevato (Figura 3).

Per quanto riguarda lo stato di danneggiamento la terminologia adottata per il rilievo era connessa all'individuazione della tipologia di lesione (lesioni isolate o diffuse, verticali o inclinate, ecc.) e al giudizio sulla gravità definita in funzione delle dimensioni della lesione stessa (lunghezza ed apertura). Seppur molto dettagliato, il rilievo non prevedeva un'individuazione del meccanismo di collasso associabile agli stati fessurativi rilevati, aspetto questo introdotto, invece, con la metodologia di rilievo attualmente in uso. Tuttavia la presenza di un rilievo tradizionale dello stato fessurativo, correlato da un'ampia documentazione fotografica, consente, in molti casi, di poter

Figura 3
Archivio delle chiese danneggiate dal terremoto del 1987 – Provincie di Modena e Reggio Emilia - Rilievo del quadro fessurativo: Duomo di Finale Emilia.

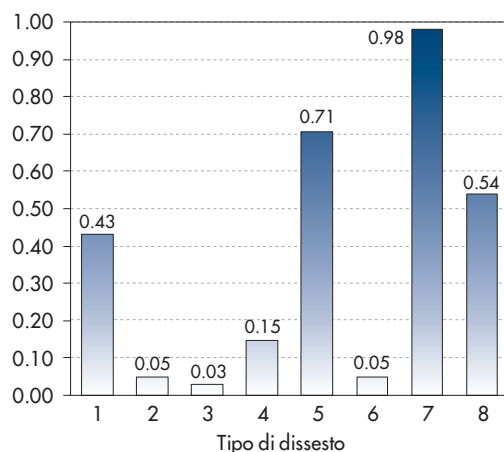


Figura 4
Database delle chiese dell'Emilia 1987: frequenza tipo di dissesto (1: crollo cornicioni e intonaco, espulsioni localizzate; 2: crollo foglia muraria; 3: crollo intera compagine muraria; 4: fuori piombo; 5: lesioni diffuse; 6: lesioni diffuse passanti; 7: lesioni isolate; 8: lesioni isolate passanti).

effettuare tale diagnosi a posteriori.

In Figura 4 sono riportate le frequenze delle tipologie di dissesto rilevate nel campione di chiese. Si osserva come la totalità del campione ha manifestato un danneggiamento (nel 98% dei casi si sono rilevate lesioni isolate e nel 71% si sono rilevate lesioni diffuse, di cui, rispettivamente, il 54% e 5% di media/grave entità), evidenziando l'elevata vulnerabilità della tipologia costruttiva e la propensione a un comportamento per parti.

4. Eventi sismici del 2012 e danno nelle chiese

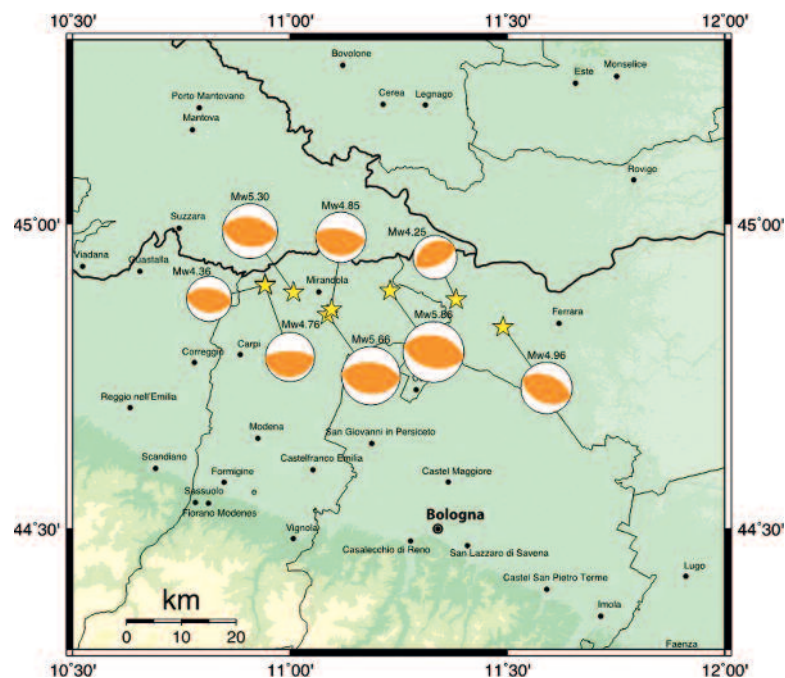
Nel maggio del 2012 la Pianura Emiliana è stata interessata da una sequenza sismica che ha provocato numerosi risentimenti nel nord Italia. Le due scosse principali sono state registrate il 20 maggio alle ore 04.03 e il 29 maggio alle ore 09.00 rispettivamente caratterizzate da una magnitudo locale pari a 5.9 e 5.8. Agli eventi principali sono susseguite numerose scosse di replica alcune delle quali di entità significativa. Tutti i terremoti principali della sequenza (Figura 5) sono avvenuti su piani di faglia orientati all'incirca Est-Ovest e con movimento compressivo in senso Nord-Sud (<http://ingvterremoti.wordpress.com/>).

La sequenza sismica ha provocato danni di entità significativa su determinate tipologie di edifici esistenti. Oltre ai danni che si sono riscontrati nelle industrie e nei capannoni prefabbricati, l'impatto sul costruito risulta particolarmente rilevante se si osservano le conseguenze sul costruito storico monumentale, in particolare

chiese e torri. Le prime testimonianze dei danni verificatesi in seguito all'evento del 20 maggio, infatti, hanno riguardato il costruito storico del Comune di Finale Emilia e dei centri limitrofi di Sant'Agostino, Mirabello e San Felice sul Panaro. Il danneggiamento sul patrimonio monumentale si è ulteriormente aggravato in seguito alla scossa del 29 maggio. Si sono registrati danni e crolli in altri edifici storici a Mirandola, San Felice sul Panaro e Camposanto, paesi già colpiti dalla scossa del 20 maggio. Conseguenze significative si sono verificate anche a Cavezzo, Medolla e nei comuni limitrofi.

Con particolare riferimento al danno osservato sulle chiese, i recenti eventi sismici, hanno provocato l'attivazione di meccanismi di collasso locale che hanno portato in molti casi al crollo parziale o totale dei diversi macroelementi interessati. I meccanismi attivati (Figura 6) ricadono nella casistica dei potenziali cinematismi attivabili già ampiamente nota in seguito alla catalogazione dei danni osservati in seguito ai passati eventi sismici. Si osservano in particolare numerosi casi di attivazione di meccanismi di risposta trasversale per la componente N-S particolarmente significativa almeno in zona epicentrale e il ribaltamento della parte sommitale della facciata. Tali meccanismi sono, in gran parte, associabili all'elevata vulnerabilità intrinseca delle costruzioni dell'area, caratterizzate da pareti molto snelle (spessore delle pareti perimetrali a tre teste), volte in foglio e coperture non efficacemente controventate. Ma questa vulnerabilità intrinseca è stata aggravata da recenti interventi di consolidamento, come le solette in c.a. estradossali, che, non essendo basati su alcuna veri-

Figura 5
Meccanismi focali e
magnitudo momento (M_w)
dei terremoti principali della
sequenza
(<http://ingvterremoti.wordpress.com/>).





fica della reale risposta strutturale della fabbrica storica, hanno contribuito unicamente a incrementarne la vulnerabilità.

Tra le chiese presenti nell'Archivio del 1987 sono state selezionate alcune danneggiate dal recente evento sismico emiliano:

- Finale Emilia: il Duomo; S. Rosario; San Francesco; Chiesa del Seminario; San Bartolomeo;
- Medolla;
- Mirandola: San Francesco.

Nelle immagini seguenti è riportata un preliminare confronto tra il danno rilevato a seguito dell'evento del 1987 e quanto osservato a seguito del terremoto del 2012.

Dal confronto tra i meccanismi di danno che si sono attivati dopo i due eventi sismici è possibile rilevare, in alcuni casi, una ricorrenza nel comportamento strutturale del manufatto. Un caso emblematico è rappresentato dalla Chiesa del S. Rosario a Finale Emilia (Figura 9) per cui si osserva una perfetta corrispondenza tra il quadro fessurativo rilevato in facciata in seguito all'evento sismico del 1987 e quanto oggi osser-

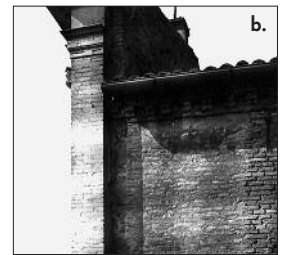
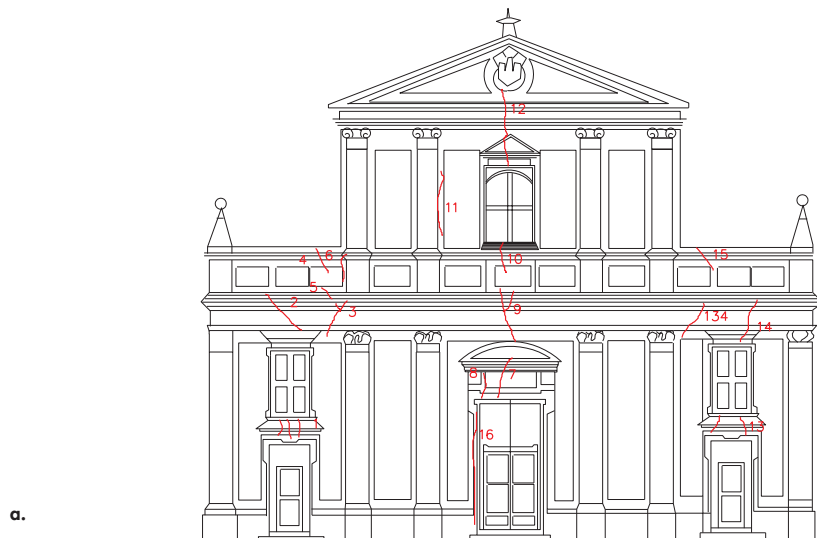
vato. Le lesioni che si sono formate sono le medesime, anche se quest'ultimo evento ha generato uno stato fessurativo di maggiore gravità con la prosecuzione della lesione centrale fino al timpano della facciata. Uno stato lesionativo analogo a quanto verificatosi nel 1987 è, inoltre, rilevabile anche nelle pareti laterali in corrispondenza delle aperture.

Tale analogia dimostra come la vulnerabilità intrinseca delle chiese rappresenta in molti casi uno degli aspetti prioritari da tenere in considerazione nella valutazione del rischio sismico. Nonostante l'azione differente che caratterizza i due eventi il risentimento è risultato analogo. Questo aspetto dimostra, infine, come interventi di consolidamento volti a riparare unicamente il danno verificatosi non incrementino di fatto la sicurezza del manufatto. Ripristinare la continuità in una compagine muraria risulta un intervento che difficilmente riesce a ricollegare efficacemente una muratura, se non affiancato ad un vero e proprio intervento di rinforzo con il quale è possibile ottenere un miglioramento sismico.

Figura 6
a) Mirabello: chiesa di San Paolo; b) Cento: chiesa parrocchiale di Buonacompria; c) Oratorio S. Croce a San Felice sul Panaro
La zona di risentimento della sequenza sismica del 2012 è in parte coincidente con quella dell'evento del 1987 (Figura 7).

Figura 7
Mappa con i comuni in cui si sono registrati danni a chiese in seguito all'evento del 1987 (in verde) e epicentri della sequenza sismica del maggio 2012 con $M > 4$.

Figura 8
Duomo di Finale Emilia:
a) rilievo del quadro
fessurativo in facciata dopo
il sisma del 1987; b) e c)
particolare lesioni pareti
laterali dopo il sisma del
1987; d) e e) danno
osservato in seguito agli
eventi del 2012.

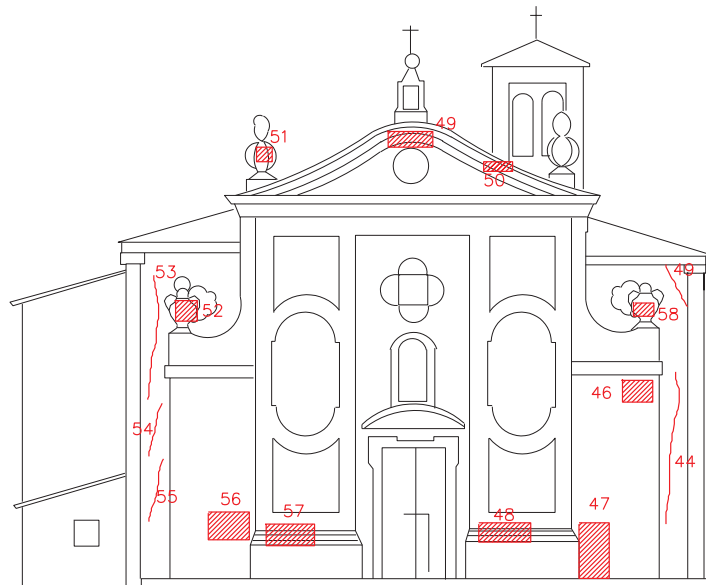


a.

Figura 9
S. Rosario Finale Emilia:
a) rilievo del quadro
fessurativo in facciata e
nella parete laterale dopo il
sisma del 1987; b) danno
osservato in seguito agli
eventi del 2012.

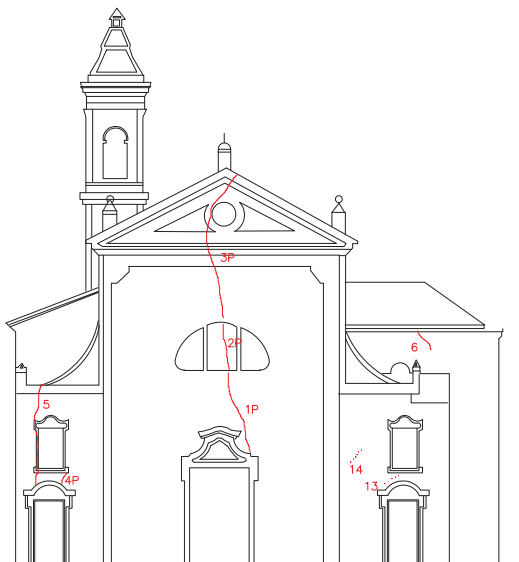
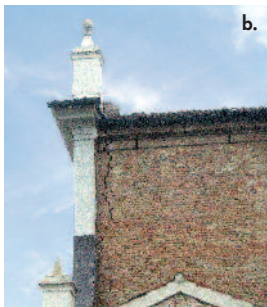


a.



a.

Figura 10
S. Francesco a Finale Emilia:
a) rilievo del quadro
fessurativo in facciata dopo
il sisma del 1987;
b) particolare lesione tra
parete e facciata dopo il
sisma del 1987;
c) danno osservato in
seguito agli eventi del
2012.



a.

Figura 11
Chiesa del Seminario a
Finale Emilia:
a) rilievo del quadro
fessurativo in facciata e
nella parete laterale dopo il
sisma del 1987;
b) danno osservato in
seguito agli eventi del
2012.

Figura 12
S. Bartolomeo a Finale
Emilia: a) rilievo del quadro
fessurativo sulla sezione
longitudinale dopo il sisma
del 1987; b) danno
osservato in seguito agli
eventi del 2012 (Magenes
et al., 2012).

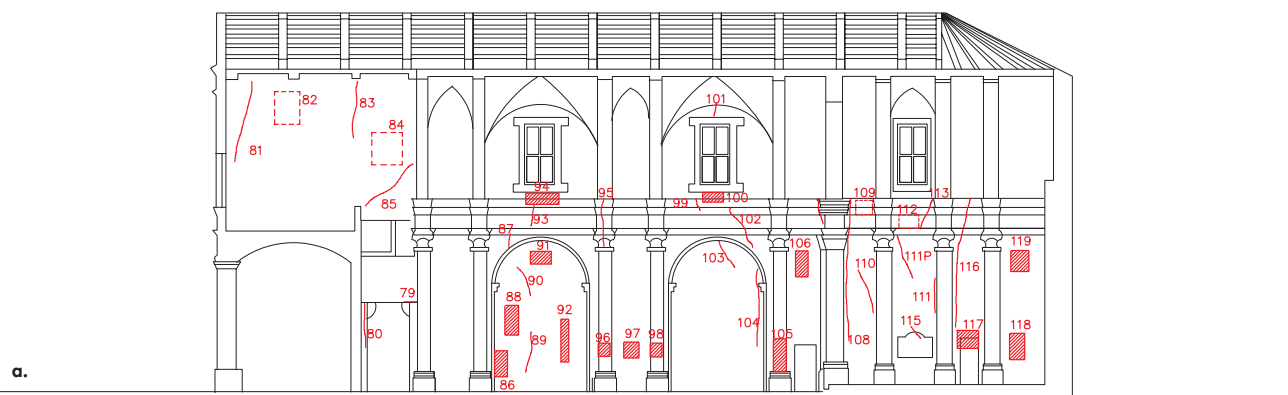
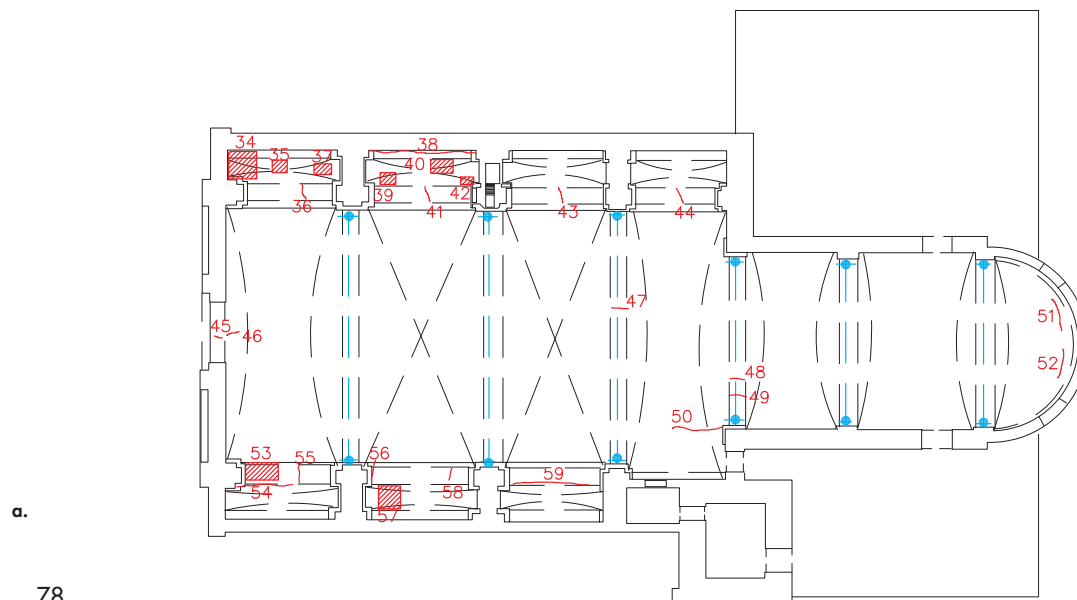


Figura 13
Chiesa di Camurana a
Medolla: a) rilievo del
quadro fessurativo in pianta
dopo il sisma del 1987;
b) danno osservato in
seguito agli eventi del 2012
(Magenes et al., 2012).



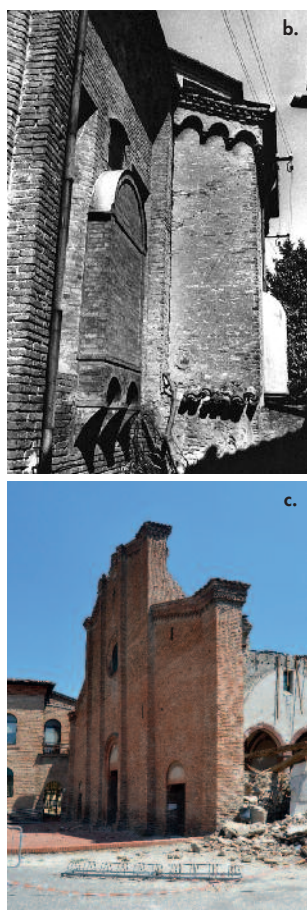
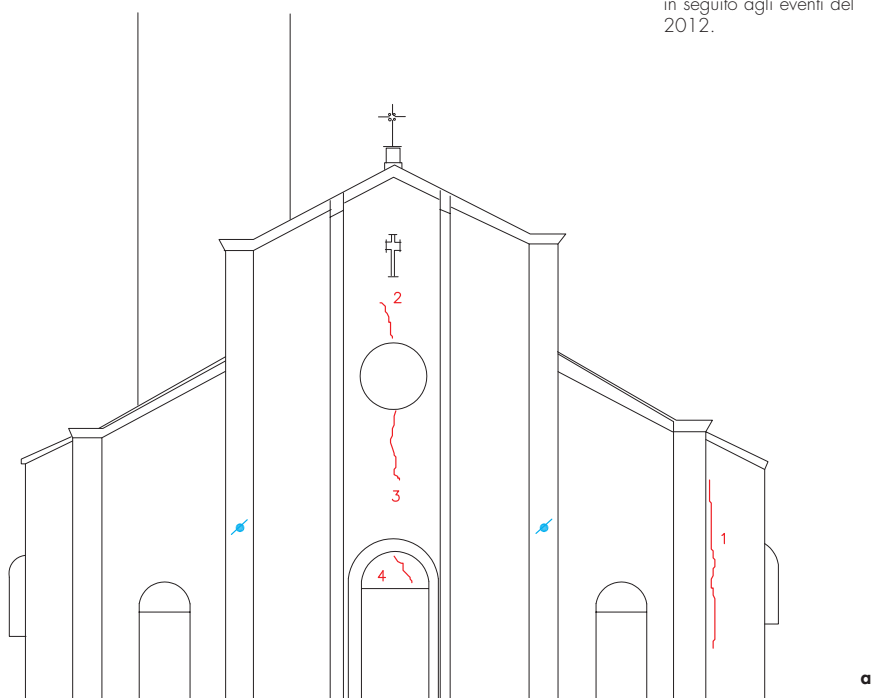


Figura 14
San Francesco a
Mirandola:
a) rilievo del quadro
fessurativo in facciata dopo
il sisma del 1987;
b) particolare lesione
verticale dopo il sisma del
1987; c) danno osservato
in seguito agli eventi del
2012.



Nel Duomo di Finale Emilia (Figura 8) la scossa del 20 maggio 2012 ha provocato, tra i vari danneggiamenti, la risposta fuori dal piano della facciata, con il crollo parziale della parte sommitale della stessa. Questo tipo di meccanismo risulta una delle fenomenologie di danno più ricorrenti, in particolare per tale evento sismico, in cui l'elemento sveltante risulta essere snello e collegato unicamente, ma non efficacemente, con la copertura della chiesa. Il ribaltamento del timpano risulta, inoltre, in via generale uno dei meccanismi di collasso più ricorrenti, rilevato in molte strutture analoghe a seguito anche di eventi sismici differenti e schematizzato in molteplici cinematismi elementari (Lagomarsino e Podestà, 2004).

Come spesso accade, il meccanismo osservato nel Duomo di Finale Emilia, seppur riconducibile a un comportamento predefinito presenta la peculiarità di avere un crollo non simmetrico della parte sommitale della facciata. Tale differenziazione rispetto agli schemi predefiniti non deve però trarre in inganno sulla possibilità di poter prevedere tale comportamento e pianificare, pertanto, un intervento di miglioramento sismico preventivo. Analizzando la documentazione disponibile contenuta nel database (Figura 8a, 8b e 8c) è possibile evidenziare il diverso grado di

ammorsamento tra la facciata e le pareti laterali, e individuare, già a livello qualitativo, la vulnerabilità di tale macroelemento anche in relazione alla mancanza di un efficace collegamento con la copertura che risulta, nonostante l'intervento di consolidamento, non opportunamente controventata. Tali fattori avrebbero potuto permettere di prevedere le modalità di danneggiamento che si sono verificate e consentire in fase preventiva di progettare ed eseguire un intervento di miglioramento sismico.

Nella chiesa di San Francesco a Finale Emilia (Figura 10), è possibile rilevare un meccanismo di danno correlabile ad un'azione fuori del piano della facciata. Dopo l'evento sismico del 1987 il meccanismo di ribaltamento ha coinvolto la facciata nella sua interezza, mentre nell'ultimo evento si è attivato il meccanismo di ribaltamento della sommità facciata. È possibile osservare dalla documentazione fotografica come il paramento murario in corrispondenza della facciata appaia oggi consolidato (Figura 10c). Questa porzione di muratura è proprio quella in cui si erano formate delle lesioni in seguito all'evento del 1987 e legate all'attivazione del meccanismo di ribaltamento della facciata (Figura 10b). L'intervento di consolidamento realizzato può aver migliorato la connes-

sione della facciata con le pareti laterali, favorendo conseguentemente l'attivazione del meccanismo nella parte sommitale dell'elemento. Per la Chiesa del Seminario (Figura 11) le modalità prevalenti di danneggiamento risultano invece differenti anche se dalla lettura del danno pregresso si poteva ipotizzare la vulnerabilità del meccanismo che si è attivato in relazione ai recenti eventi. Una lesione passante legata all'attivazione di un meccanismo di piano della facciata (Figura 11a) è stata rilevata in seguito all'evento del 1987, mentre ad oggi si nota una prevalente risposta fuori dal piano della sommità dell'elemento (Figura 11b). Una differente direzionalità dell'azione sismica prevalente che ha colpito il manufatto, può essere una delle cause di questa diversità di comportamento. Tuttavia, è possibile osservare come in corrispondenza del cantonale, si siano formate lesioni da distacco anche in seguito all'evento del 1987 (Figura 11a) seppure di lieve entità. Tale aspetto pone nuovamente l'attenzione sulla vulnerabilità aggiuntiva che un danno pregresso può provocare.

Il rilievo del danno eseguito sulla Chiesa di San Bartolomeo (Figura 12) in seguito alla sequenza sismica del 2012 (Magenes et al., 2012) evidenzia la presenza di lesioni in corrispondenza del collegamento tra le pareti e la facciata, con incipiente pericolo di attivazione di meccanismi di ribaltamento del timpano e della facciata. Internamente la volta è completamente crollata (www.parrochia-finaleemilia.it). La volta appare già notevolmente danneggiata in seguito all'evento del 1987 con la presenza di lesioni gravi isolate e diffuse sia nell'aula che nelle cappelle laterali. Anche in questo caso si può inoltre osservare come in seguito all'evento del 1987 si fosse già formata una lesione da ribaltamento in corrispondenza del collegamento tra la facciata e le pareti laterali (Figura 12a).

Nella chiesa di San Luca Evangelista a Camurana (Figura 13) l'evento sismico del 1987 ha generato unicamente una lesione di lieve entità in facciata e uno stato fessurativo in corrispondenza dell'abside della chiesa (Figura 13a), mentre il più recente sisma ha provocato il crollo del timpano e di parte della facciata (Figura 13b) (Magenes et al., 2012). Pur non esistendo una diretta correlazione tra i danni osservati dopo i due eventi sismici, dal rilievo del 1987 è tuttavia rilevabile una diversa vulnerabilità della chiesa nelle due direzioni principali (longitudinale e trasversale); viene, infatti, rilevata la presenza di catene in corrispondenza degli archi trasversali ma nessuna in direzione longitudinale (Figura 13a). Tale aspetto può essere una delle cause che può aver favorito il diverso comportamento nelle due direzioni.

La Chiesa di San Francesco a Mirandola (Figura

14), ha subito il crollo totale della navata e di una parete laterale a causa dell'elevata snellezza delle pareti. In questo caso ha giocato un ruolo fondamentale anche la componente N-S dell'azione sismica prevalente rispetto alla componente E-W, favorendo l'attivazione di meccanismi riconducibili alla risposta trasversale. La mancanza di ammortamento tra i vari macroelementi ha, infine, determinato l'impossibilità di utilizzare le pareti parallele alla direzione dell'azione sismica prevalente come efficaci pareti di controvento, aumentando la vulnerabilità del sistema trasversale. Il comportamento che si è manifestato era preventivabile in quanto a seguito dell'evento del 1987 la facciata presentava una lesione passante (analogo a quella che si è verificata a seguito del recente terremoto), le cappelle laterali mostravano l'attivazione di un meccanismo di ribaltamento, le volte della navata centrale presentavano lesioni in direzione N-S, tutte evidenze di una elevata vulnerabilità trasversale della chiesa.

5. Modelli di previsione del danno atteso

L'analisi qualitativa del danneggiamento occorso dopo il terremoto del 1987 e dopo il recente evento sismico ha permesso di evidenziare come sia possibile riconoscere comportamenti analoghi dei diversi manufatti seppur sottoposti da azioni fortemente differenti. Partendo da due casi studio (Duomo e Chiesa di San Francesco a Finale Emilia) si è voluto investigare se i meccanismi prevalenti che si sono verificati potessero essere preventivamente individuati e conseguentemente contrastati attraverso opportuni interventi di miglioramento sismico.

Lo studio vuole inoltre valutare se i metodi di verifica proposti dalle normative tecniche vigenti possano ritenersi funzionali ai fini di garantire il raggiungimento del livello di sicurezza definito in relazione allo stato limite di riferimento. In particolare si sono adottati i riferimenti normativi attualmente disponibili sia a livello di metodi di verifica (Direttiva P.C.M. 9 febbraio 2011, Gazzetta Ufficiale n. 47 del 26 febbraio 2011 - Supplemento ordinario n. 54; Norme Tecniche per le Costruzioni, D.M. 14 gennaio 2008 e relativa Circolare applicativa del 2 febbraio 2009, n. 617) sia a livello della definizione della pericolosità dell'area (NTC, D.M. 14 gennaio 2008). I metodi di verifica proposti dalla normativa vigente sono basati sull'analisi limite dell'equilibrio secondo un approccio cinematico. Le NTC (C8A.4.2.3, Circolare 2 febbraio 2009, n. 617) prevedono in particolare due diverse modalità di verifica: analisi cinematica lineare e non lineare. Le verifiche secondo l'analisi cinematica lineare consistono nel confronto tra l'accelerazione spettrale a_0^* che attiva

il meccanismo e che rappresenta la capacità del sistema, con la domanda sismica. L'azione sismica è definita in funzione della pericolosità del sito e amplificata nei casi di meccanismi di collasso posizionati ad una certa quota. In questi ultimi casi è infatti necessario tenere conto che l'accelerazione alla quota del cinematismo può essere amplificata rispetto a quella valutata alla quota del suolo a causa dell'effetto filtro della struttura sottostante. L'accelerazione spettrale α_0^* è invece ricavata in funzione del valore moltiplicatore dei carichi α_0 che porta all'attivazione del cinematismo e definito applicando il Principio dei Lavori Virtuali, in termini di spostamenti, alla catena cinematica (C8A.4.1, Circolare 2 febbraio 2009, n. 617). Il moltiplicatore orizzontale α_0 è in particolare definito sulla base della seguente equazione:

$$\alpha_0 \left(\sum_{i=1}^n P_i \delta_{x,i} + \sum_{j=n+1}^{n+m} P_j \delta_{x,j} \right) + \sum_{i=1}^n P_i \delta_{y,i} - \sum_{h=1}^o F_h \delta_h = L_{fi} \quad (1)$$

in cui:

- P_i generica forza peso applicata al cinematismo: essa rappresenta sia il peso proprio dei blocchi, applicato nel rispettivo baricentro, sia altri carichi verticali che gravano sugli stessi;
- P_j generica forza peso, non direttamente applicata sui blocchi, la cui massa, per effetto dell'azione sismica, genera una forza orizzontale sugli elementi della catena cinematica, in quanto non efficacemente trasmessa ad altre parti dell'edificio;
- F_h generiche azioni esterne agenti sui blocchi rigidi;
- L_{fi} generiche azioni interne: esse sono rappresentate, per esempio dalle forze interne generate dall'ingranamento tra i conci murari.

La verifica secondo l'analisi cinematica non lineare richiede la definizione della capacità di spostamento della struttura fino al collasso attraverso il meccanismo considerato. È conseguentemente necessario definire l'andamento del moltiplicatore dei carichi α (rapporto tra le forze orizzontali applicate ed i corrispondenti pesi delle masse presenti) in funzione dello spostamento d_k di un punto di riferimento del sistema fino all'annullamento della forza sismica orizzontale. Noto tale andamento, per effettuare la verifica, deve essere definita la curva di capacità dell'oscillatore equivalente, come relazione tra l'accelerazione a^* e lo spostamento d^* (C8A.4.2.2, Circolare 2 febbraio 2009, n. 617). A differenza di quanto previsto per l'analisi cinematica lineare, in questo caso la verifica

viene effettuata in termini di spostamento confrontando la capacità ultima del sistema d_u^* con la domanda di spostamento richiesta dal sisma. Anche in questo caso, la presenza di un meccanismo locale che interessa una porzione della costruzione posta ad una certa quota, ai fini della verifica deve essere considerato lo spettro di risposta filtrato a ragione dell'esistenza della struttura sottostante.

Per la particolare forma degli spettri amplificati, si è considerato che lo spostamento associato al periodo T_S , sia pari allo spostamento massimo registrato per $0 < T \leq T_S$.

Le analisi di seguito riportate sono state effettuate utilizzando il codice di calcolo Mc4Loc[®] della Mc4 software[®], che consente di effettuare le verifiche nei confronti dello Stato Limite della Salvaguardia della Vita e dello Stato Limite di Danno come richiesto dalla NTC (D.M. 14 gennaio 2008) e dalla Circolare applicativa (n. 617 del 2 febbraio 2009). Operando direttamente in ambiente AutoCAD[®] il programma consente, infatti, di eseguire le verifiche tramite l'analisi cinematica lineare e non lineare per un qualsiasi meccanismo di danno applicato a un qualunque macroelemento.

5.1 Duomo di Finale Emilia

Il Duomo di Finale Emilia, come già in precedenza mostrato, è stato gravemente danneggiato dalla sequenza sismica del maggio del 2012. Il principale meccanismo di collasso attivatosi è legato a un'azione fuori dal piano della facciata che ha portato al crollo della porzione sommitale della stessa (Figura 8d e 8e; Figura 15). Si sono, inoltre, verificati crolli nelle volte in foglio in muratura delle navate laterali (Figura 15b e 15c), lesioni negli arconi del colonnato, uno stato lesionativo diffuso nelle volte e nelle pareti di abside e presbiterio.

Il meccanismo di ribaltamento del timpano che si è attivato, presenta la peculiarità di essere asimmetrico. Questo tipo di comportamento, anche se potenzialmente legato a diversi fattori, tra cui l'input sismico, poteva essere previsto a partire dalla documentazione già disponibile. Osservando il quadro fessurativo e la documentazione fotografica effettuata dopo il terremoto del 1987 è possibile rilevare un differente grado di ammorsamento della facciata con le pareti laterali (Figura 16 lesione 62 - Figura 17 lesione 46). La copertura è stata, inoltre, oggetto di un intervento di "consolidamento" (Figura 18) che ha portato alla realizzazione di una soletta in calcestruzzo al di sopra delle pianelle in laterizio e al posizionamento di barre metalliche annegate nel getto e ancorate in facciata tramite bolzoni, con la funzione di collegamento del timpano alla copertura. Il danneggiamento che



Figura 15
Duomo di Finale Emilia:
cinematismo di collasso
della sommità della
facciata, vista esterna ed
interna, e danno alle volte
della navata laterale
(www.parrocchia-
finaleemilia.it).

si è verificato dimostra come il sistema di incatenamento realizzato possa ritenersi sottodimensionato, anche a ragione della limitata capacità deformativa dei due elementi metallici imputabile principalmente alle modalità esecutive. Sulla base di queste considerazioni e con il proposito di valutare la sicurezza del macroelemento tramite i metodi di verifica proposti nelle NTC (D.M. 14 gennaio 2008), è stata studiata la vulnerabilità nei confronti dell'attivazione di tre

meccanismi di collasso, rappresentati in Figura 19, relativi al ribaltamento della porzione sommitale della facciata. In un'ottica di verifica preventiva, proprio in virtù della conoscenza del manufatto, è, infatti, possibile individuare già a livello qualitativo un'elevata vulnerabilità della parte sommitale della facciata. La presenza di ammortamento asimmetrico tra la facciata e le pareti laterali (nella parte sommitale) consente la definizione di un duplice cinematismo che gra-

Figura 16
Duomo di Finale Emilia:
rilievo del danno
prospetto D.

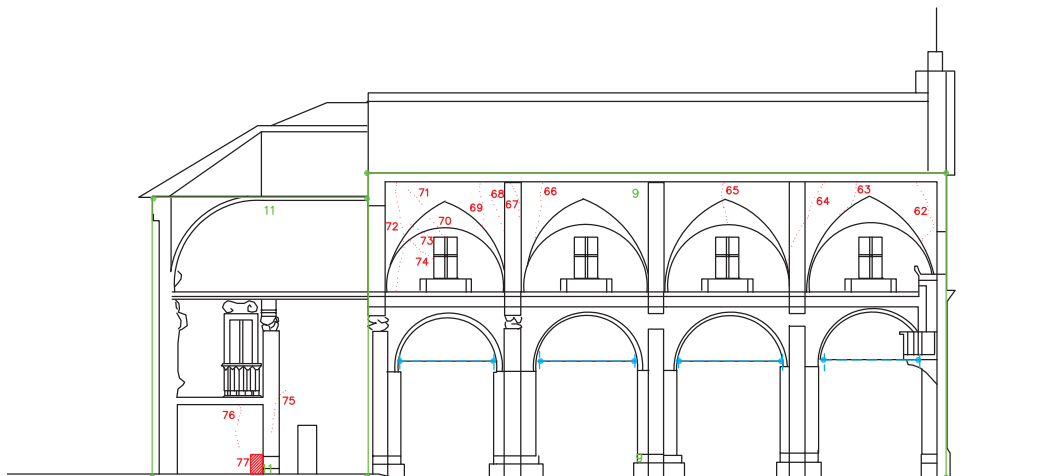
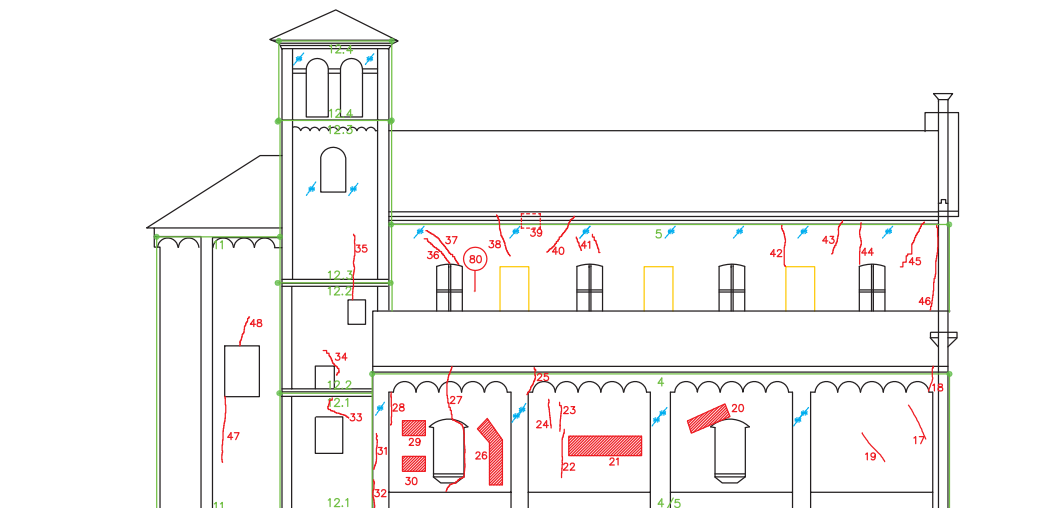


Figura 17
Duomo di Finale Emilia:
rilievo del danno
prospetto B.





dua il grado di vincolo che la parete laterale (ben ammassata) può offrire alla facciata. Nel meccanismo 2 il buon ammassamento laterale è stato schematizzato con una quota parte di parete (cuneo a 20°) che viene ad essere coinvolto dal ribaltamento della facciata. Nel caso del meccanismo 3 il livello di ammassamento tra la facciata e la parete laterale è tale da modificare le modalità di danno con la formazione di una cerniera cilindrica inclinata rispetto all'orizzontale. In entrambi i casi l'analisi della documentazione di archivio consente di individuare come il coinvolgimento delle pareti laterali in un meccanismo di ribaltamento può essere considerato solo per uno dei due lati. La conoscenza del manufatto, delle sue caratteristiche costruttive rappresenta, infatti, uno degli aspetti peculiari in un'analisi di vulnerabilità. In molti casi, come in questo caso specifico, pur restando il manufatto l'unica fonte diretta con la quale è necessario confrontarsi, la documentazione d'archivio permette di recuperare moltissime informazioni che possono essere utilizzate anche in una verifica della sicurezza sismica di un timpano della facciata di una chiesa. Ipotizzando tuttavia di trovarsi in una condizione di scarsa conoscenza del manufatto, è stato inoltre analizzato un meccanismo di ribaltamento della

sommità della facciata nell'ipotesi di una totale mancanza di connessione con le pareti laterali (meccanismo 1).

Seppur uno studio preventivo esaustivo della vulnerabilità della chiesa non può limitarsi ad un solo meccanismo di danno e pertanto sarebbe necessario analizzare tutti i cinematici che possono attivarsi in tale manufatto, la particolare conformazione della parte sommitale della facciata evidenziava, già precedentemente al terremoto, come tale cinematico fosse uno dei più vulnerabili.

La valutazione dei carichi applicati ai cinematici è stata effettuata sulla base di quanto è ottenibile dalla documentazione di rilievo disponibile (*Archivio delle chiese danneggiate dal terremoto del 1987 - Province di Modena e Reggio Emilia*) e di quanto osservato nella documentazione fotografica.

Sono stati, in particolare, considerati: il peso proprio della muratura e della copertura gravante sul macroelemento; la forza inerziale (P_i) dovuta sia alla copertura sia alla volta in canniccio dell'aula; la presenza di due catene metalliche, nella configurazione colpita dall'ultimo evento sismico.

In Tabella 1 si riporta una sintesi delle verifiche di sicurezza dei due meccanismi esaminati conside-

Figura 18
Duomo di Finale Emilia:
elementi metallici.

Figura 19
Duomo di Finale Emilia:
meccanismi di collasso:
a) meccanismo 1;
b) meccanismo 2;
c) meccanismo 3.

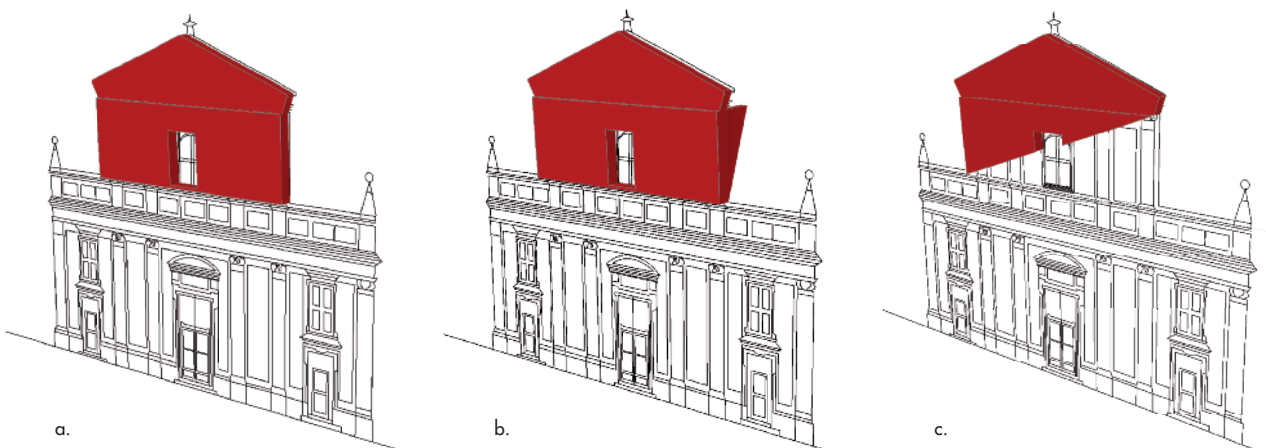


Tabella 1 - Risultati dell'analisi cinematica lineare

Stato Limite di Salvaguardia della Vita			
	Accelerazione spettrale [m/s ²]	Domanda sismica [m/s ²]	Verifica
Meccanismo 1	0.335	2.408	NO
Meccanismo 2	0.360	2.408	NO
Meccanismo 3	0.527	2.886	NO

rando la pericolosità sismica del sito come previsto nelle NTC con riferimento allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita. L'azione è stata valutata considerando una vita nominale V_N pari a 50 anni e un coefficiente d'uso C_u pari a 1.5 (NTC punto 2.4.2 - Classe d'uso III). In riferimento alla categoria di sottosuolo e alle condizioni topografiche, nelle verifiche di seguito riportate, è stato assunto un suolo di tipo C, senza effetti di amplificazione legati alla topografia.

Come si osserva in Tabella 1, le verifiche secondo l'analisi cinematica lineare non sono soddisfatte, evidenziando l'elevata vulnerabilità della chiesa nei confronti dell'attivazione di un cinematismo di

collasso della sommità della facciata. È difficile, con tale metodo di verifica, prevedere quale meccanismo possa effettivamente attivarsi dal momento che la domanda sismica tende a modificarsi in virtù della differente quota di posizionamento della cerniera rispetto la quale si attiva il meccanismo. Quello che emerge, in ogni caso, soprattutto ricordando la convenzionalità delle verifiche proposte dalla Circolare n. 617 del 2009 e dell'aleatorietà (più o meno valutabile) dei parametri che entrano in gioco, è l'elevata vulnerabilità del cinematismo che pone la necessità di un intervento preventivo. La Norma Tecnica, tuttavia, ci consente un affinamento della verifica che si

Tabella 2 - Risultati dell'analisi cinematica non lineare

Analisi cinematica non lineare				
	Curva di capacità	Capacità di spostamento [m]	Domanda [m]	Verifica
Meccanismo 1		0.198	0.163	SI
Meccanismo 2		0.210	0.199	SI
Meccanismo 3		0.193	0.197	NO

Tabella 3 - Risultati dell'analisi cinematica lineare

	Stato Limite di Salvaguardia della Vita		
	Accelerazione spettrale [m/s ²]	Domanda sismica [m/s ²]	Verifica
Meccanismo 1	1.167	2.408	NO
Meccanismo 2	1.221	2.408	NO
Meccanismo 3	1.649	2.886	NO

può condurre con l'analisi cinematica non lineare, andando a controllare la capacità di spostamento del macroelemento e confrontandola con la domanda imposta dal terremoto (approccio cinematico non lineare). La ri-verifica degli stessi meccanismi effettuata adottando l'approccio non lineare, mostra come nel caso dei primi due meccanismi la capacità di spostamento risulti superiore alla domanda (verifica soddisfatta), situazione che al contrario non si verifica per il terzo meccanismo analizzato (Tabella 2). Questo tipo di risultato risulta essere in accordo con quanto effettivamente osservato in seguito al recente evento sismico, la cui azione ha portato al crollo della parte sommitale del timpano della facciata con la stessa modalità riprodotta dal meccanismo 3.

L'approccio cinematico non lineare permette, almeno per il caso in questione, di prevedere le modalità di danno che si sono poi effettivamente verificate. Questo risultato ottimale è, tuttavia, fortemente condizionato dai parametri in gioco, e non deve confondere sulla vera utilità di un approccio meccanico nella valutazione della sicurezza sismica che rimane, in primo luogo, l'individuazione dei cinematismi potenzialmente a maggior rischio e sulla possibilità di potere intervenire preventivamente. La prevenzione, intesa come un miglioramento sismico precedente all'accadimento di un terremoto, appare, a giudizio di molti, oggi come in passato, per differenti motivazioni, difficilmente proponibile. Per contro però gli eventi sismici che si sono verificati sul territorio nazionale hanno portato la realizzazione di molti interventi di riparazione e consolidamento su molti manufatti storici, così come gli interventi connessi alla manutenzione più o meno straordinaria che viene effettuata sul patrimonio tutelato. In senso lato, data la frequenza degli eventi sismici italiani, la stessa fase di ricostruzione può essere intesa come una fase preventiva. La realtà dei fatti mostra, però, come solo in pochi casi tali accadimenti vengano sfruttati efficacemente attraverso interventi migliorativi, mentre spesso si peggiori il comportamento strutturale come se l'evento appena occorso non fosse servito da monito per un accadimento che può ripetersi in futuro.

In situazioni analoghe a quelle rappresentate dal Duomo di Finale Emilia, il collasso della parte sommitale della facciata sarebbe stato limitato attraverso interventi oculati, controven-

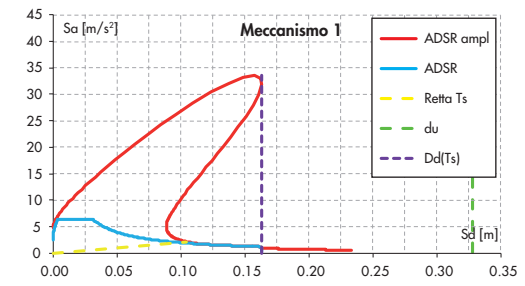
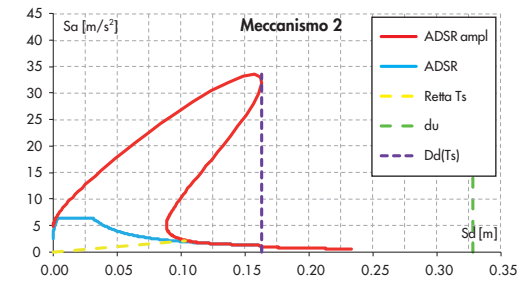
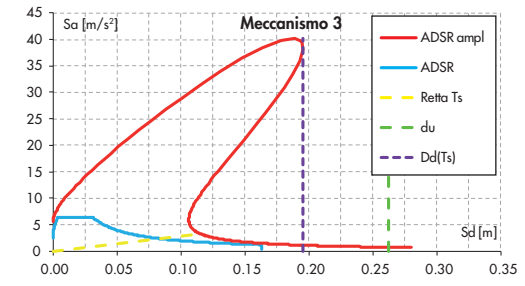
tando la copertura senza incrementarne la massa in sommità (evitando quindi la realizzazione della soletta in calcestruzzo, al di sopra delle piastrelle in laterizio) ed inserendo due nuovi tiranti metallici. La realizzazione di un controventamento efficace della copertura consente, in particolare, di eliminare l'azione inerziale della copertura (martellamento) che si viene ad attivare in occasione di un sisma. Tale contributo è tenuto in conto nelle verifiche proposte nelle Norme Tecniche tramite il contributo P_j che in caso di copertura controventata, non viene ad essere presente. Di seguito (Tabella 3 e Tabella 4) sono riportate le verifiche di entrambi i meccanismi riportati in Figura 19 a seguito della realizzazione dell'intervento di miglioramento sismico descritto.

Nelle verifiche sopra riportate, le catene sono state posizionate alla quota di imposta della copertura considerando un pre-tiro di 10 kN ad elemento e computando una deformazione plastica ultima pari al 10% della lunghezza della catena (15 m), valore cautelativo in relazione alle evidenze sperimentali (Podestà & Scandolo, 2012). È, inoltre, stato ipotizzato il miglioramento della connessione tra la facciata e le pareti laterali al fine di poter considerare un comportamento simmetrico di entrambi i cantonali.

Le verifiche effettuate evidenziano il notevole miglioramento del comportamento sismico prodotto dagli interventi ipotizzati. Sebbene la verifica secondo il solo approccio dell'analisi cinematica lineare non risulti ancora soddisfatta, il valore dell'accelerazione spettrale di attivazione del cinematismo risulta ampiamente incrementato rispetto alla situazione pre-intervento. L'effetto migliorativo degli interventi è, inoltre, apprezzabile anche con riferimento all'analisi cinematica non lineare in cui si osserva un notevole decremento della domanda di spostamento richiesta dal sisma a ragione della presenza delle nuove catene metalliche. In queste condizioni le verifiche in spostamento secondo l'approccio non lineare risultano in tutti i casi soddisfatte.

Se si valuta, per i tre meccanismi considerati, il T_R per il quale la domanda di spostamento risulta uguale alla capacità ($T_R=2475$ anni, per il meccanismo 1 e 2; $T_R=2108$ anni, per il meccanismo 3) e si grafica lo spettro elastico non amplificato in relazione a quelli registrati (Figura 20), si può osservare

Tabella 4 - Risultati dell'analisi cinematica non lineare

Analisi cinematica non lineare				
	Curva di capacità	Capacità di spostamento [m]	Domanda [m]	Verifica
Meccanismo 1		0.328	0.163	SI
Meccanismo 2		0.328	0.163	SI
Meccanismo 3		0.262	0.195	SI

come, un intervento progettato nelle rispetto delle Norme Tecniche e della conservazione del manufatto, avrebbe garantito un margine di sicurezza sufficiente a evitare il crollo del macroelemento. Nel caso in cui si volesse soddisfare anche le verifiche allo SLD, sarebbe necessario progettare e realizzare un intervento più cautelativo, migliorando, per esempio, il collegamento tra la facciata e la copertura. L'inserimento di un contro-telaio in acciaio, per esempio, vincolato al timpano ed alle pareti laterali può di fatto impedire

l'attivazione di un meccanismo di ribaltamento della parte sommitale. Tuttavia, l'incremento di sicurezza non è assoluto in quanto la particolare conformazione della facciata potrebbe causare in ogni caso l'attivazione di un meccanismo di flessione verticale (Figura 21). Tale meccanismo è, tuttavia, meno vulnerabile, presentando un'accelerazione spettrale di attivazione pari a 6.671 m/s^2 , ben più alta dei valori di riferimento della domanda 2.187 m/s^2 (SLD) e 3.032 m/s^2 (SLV).

Figura 20
Spettri naturali registrati a Mirandola (1° evento) e spettri di progetto per uguagliare domanda e capacità di spostamento (2475 anni per il meccanismo 1 e 2, 2108 anni per il meccanismo 3).

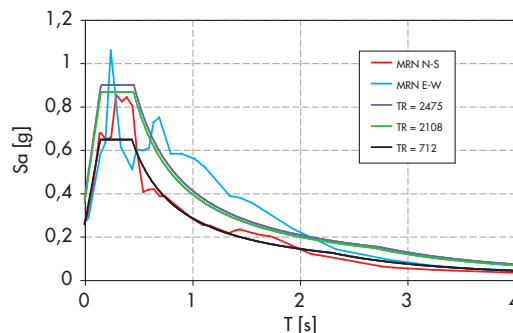




Figura 21
Meccanismi di flessione verticale.

5.2 Chiesa di San Francesco a Finale Emilia

Anche la chiesa di San Francesco a Finale Emilia è stata gravemente danneggiata dall'evento sismico del maggio del 2012 che ha causato l'attivazione di un meccanismo di ribaltamento della parte sommitale della facciata. Da quanto si osserva dalla documentazione fotografica (www.parrocchia-finaleemilia.it) si sono, inoltre, verificati crolli nelle volte dell'aula e del presbiterio (Figura 22).

I sopralluoghi effettuati successivamente al terremoto hanno mostrato uno stato di danno in corrispondenza della facciata che evidenzia un buon collegamento con le pareti laterali, data la

presenza di lesioni inclinate. La presenza di uno stato fessurativo nella parte bassa della parete laterale (Figura 23a) pone evidenza su come si sia attivato, o abbia provato ad attivarsi, anche un meccanismo di ribaltamento di tutto il macroelemento. La differente vulnerabilità e gli effetti filtro dell'input sismico hanno poi determinato un danneggiamento più marcato in corrispondenza della sommità della facciata (Figura 23b).

Inoltre il meccanismo che si è attivato può essere stato favorito dall'azione inerziale della volta dell'aula e ovviamente da una carenza di collegamento tra gli elementi di copertura e le pareti.



Figura 22
Chiesa di San Francesco a Finale Emilia: cinematico di collasso della sommità della facciata, vista esterna ed interna, e danno alle volte (www.parrocchia-finaleemilia.it).



Figura 23
Evidenza della presenza di ammoramento nei meccanismi attivati.

Figura 24
Chiesa di San Francesco a
Finale Emilia: meccanismi di
collasso della facciata:
a) meccanismo 1;
b) meccanismo 2.

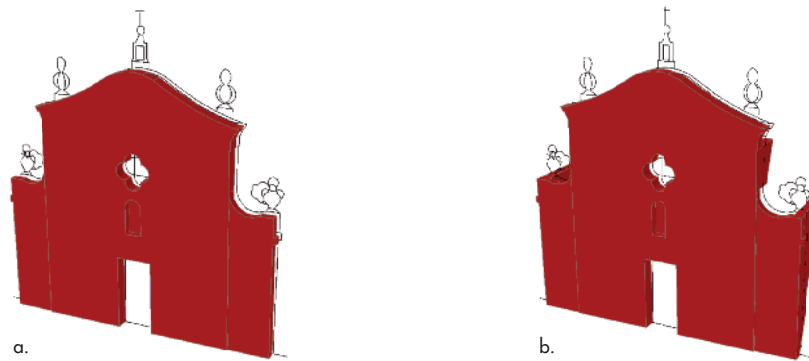
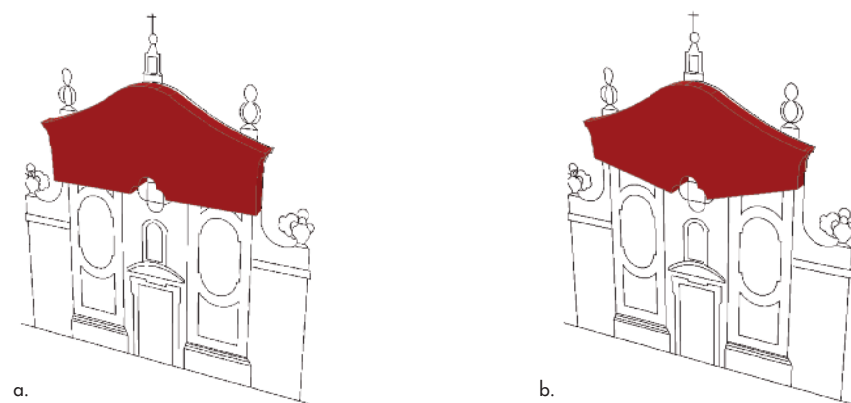


Figura 25
Chiesa di San Francesco a
Finale Emilia: meccanismi di
collasso della sommità della
facciata: a) meccanismo 3;
b) meccanismo 4.



Con il proposito di valutare, anche in questo caso, la sicurezza sismica è stata analizzata la sicurezza della chiesa nei confronti dell'attivazione dei meccanismi di collasso rappresentati in Figura 24 e Figura 25.

Si sono in questo caso considerate due diverse modalità di danneggiamento della facciata, il ribaltamento totale e il ribaltamento della sola sommità. Il ribaltamento della facciata è stato analizzato sia considerando l'ammorsamento, sia trascurandolo. Il database forniva già alcune informa-

zioni che possono essere tenute in considerazione in un'analisi preventiva. Ad esempio le lesioni presenti a seguito del terremoto del 1987 che mostrano un grado di ammorsamento molto limitato (Figura 26a) sono state successivamente consolidate attraverso un intervento che ha incrementato la connessione con la facciata (Figura 26b). I risultati delle verifiche secondo l'approccio cinematico lineare sono riportate in Tabella 5 mentre per l'approccio cinematico non lineare in Tabella 6.

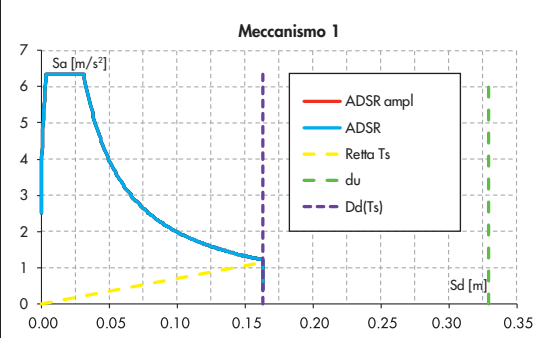
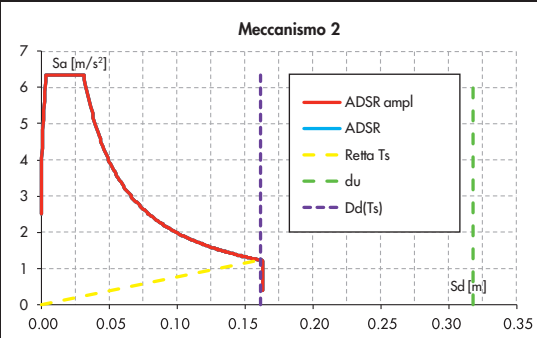
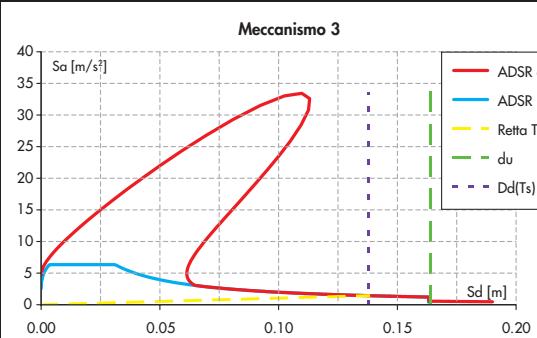
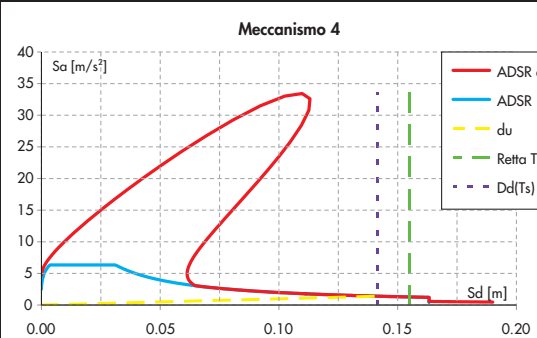
Figura 26
a) Parete laterale dopo il
terremoto del 1987.
b) Parete laterale dopo
l'evento del 2012.



Tabella 5 - Risultati dell'analisi cinematica lineare

Stato Limite di Salvaguardia della Vita				
	Accelerazione spettrale [m/s ²]	Domanda sismica [m/s ²]	Rapporto a_0^*/a_{slv}	Verifica
Meccanismo 1	0.379	1.257	0.30	NO
Meccanismo 2	0.487	1.257	0.39	NO
Meccanismo 3	0.817	2.398	0.34	NO
Meccanismo 3	0.725	2.398	0.30	NO

Tabella 6 - Risultati dell'analisi cinematica non lineare

Analisi cinematica non lineare				
	Curva di capacità	Capacità di spostamento [m]	Domanda [m]	Verifica
Meccanismo 1		0.329	0.167	SI
Meccanismo 2		0.318	0.167	SI
Meccanismo 3		0.164	0.140	SI
Meccanismo 4		0.155	0.144	SI

I risultati ottenuti dall'analisi cinematica lineare (correlabili con il livello di attivazione del meccanismo) mostrano come tutti i meccanismi siano ugualmente vulnerabili nonostante capacità diverse. Se si analizza, infatti, il rapporto tra l'accelerazione che attiva il meccanismo e l'accelerazione a SLV si può notare come il valore sia simile, determinando una analoga possibilità di attivazione anche per i cinematismi che interessano la parte sommitale della facciata, in virtù dell'amplificazione causata dall'effetto filtro della facciata stessa. Analizzando invece, i risultati dell'analisi non lineare, risulta evidente come tutti i meccanismi considerati siano verificati, dal momento che le risorse in termini di spostamento sono compatibili con le richieste sismiche, associate a un tempo di ritorno di 712 anni.

Il confronto di tale duplice previsione con il livello di danneggiamento verificatosi dopo l'evento del 2012 mostra come il cinematismo di danno attivato sia quello che dell'analisi precedente è risultato il più vulnerabile. La conoscenza nel dettaglio delle modalità dell'intervento di consolidamento realizzato dopo il 1987 avrebbe permesso di individuare in maniera quasi univoca il cinematismo più vulnerabile, sottolineando quanto la fase di conoscenza sia fondamentale per l'affidabilità della sicurezza strutturale di un edificio esistente. Anche analizzando i risultati dell'analisi cinematica non lineare si ha un buon accordo con il livello di danneggiamento verificatosi dal momento che la struttura, seppur danneggiata, risulta lontana dal superamento dello stato limite di salvaguardia della vita (SLV). In linea teorica, infatti, il meccanismo che si è attivato è in grado di sopportare un'azione legata a un T_R di 937 anni.

6. Conclusioni

Gli effetti, purtroppo sempre devastanti, degli eventi sismici che si verificano sul territorio nazionale mostrano in maniera chiara come la vulnerabilità che ci deve preoccupare maggiormente non sia tanto quella propria delle costruzioni, quanto piuttosto la "vulnerabilità sistemica" del nostro agire, che non è in grado di governare un processo di pianificazione di un percorso organico di conoscenza, di verifica della sicurezza e di riduzione del rischio sismico del patrimonio architettonico. Nella maggior parte dei casi non si tratta di mancanza di cono-

scenza tout court, che invece è spesso celata in qualche archivio "tradizionale" o "informatico" o in una norma. Né si può parlare di mancanza di risorse economiche: a fronte di interventi faraonici, e mediaticamente rilevanti, il miglioramento sismico passa, generalmente, attraverso interventi semplici e costi contenuti. Non è quindi sempre sostenibile la tesi del "non avere potuto fare" per mancanza di risorse. È un dato oggettivo, infatti, che i costi della prevenzione sono enormemente inferiori a quelli della ricostruzione; inoltre, è dimostrato che non sono gli interventi più costosi che determinano il maggior incremento della sicurezza sismica.

Valutare e ridurre la vulnerabilità sismica del patrimonio culturale rappresenta in primo luogo una sfida culturale che ci deve costringere a trattare, in un'ottica preventiva, il rischio sismico, abbandonando la consuetudine di un problema che bisogna affrontare solo ogni qual volta un terremoto si verifica. Da questo punto di vista gli strumenti normativi proposti dal Ministero dei Beni e delle Attività Culturali consentirebbero un notevole passo avanti, attraverso un duplice livello di valutazione (LV1 analisi semplificata; LV2-LV3 analisi di dettaglio), metodologia che si adatta in maniera specifica all'esigenza di individuare da un lato i manufatti più a rischio e dall'altro definire gli interventi di miglioramento sismico.

Nonostante la normativa tecnica per il patrimonio culturale sia ormai consolidata nel metodo (le prime Linee Guida risalgono al 2007) le applicazioni sul territorio sono poche in relazione ai numeri dei manufatti da tutelare. Si preferisce, infatti, continuare a operare in termini di riparazione del danno (intervento ex post), nell'aberrazione culturale di pensare di poter risarcire la perdita del dato storico, piuttosto che ragionare nell'ottica di verifica della vulnerabilità e prevenzione del danno. Molto però potrebbe essere fatto, anche in tempi relativamente brevi, recuperando dati già raccolti (anche per scopi diversi) e riprocessandoli nei modelli di vulnerabilità proposti dalle Linee Guida. Il caso portato da esempio in questo lavoro mostra come l'utilizzo dei rilievi eseguiti dopo il terremoto del 1987 di alcune chiese ("conoscenza") avrebbe potuto salvarle evitando di raggiungere un livello di danneggiamento tale da comprometterle irrimediabilmente, trasformando così un evento naturale in una catastrofe.

Bibliografia

Circolare n. 26 del 2 dicembre 2010 (2010) - Ministero per i Beni e le Attività Culturali "Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale", Gangemi Editore, Roma.

Archivio delle chiese danneggiate dal terremoto del (1987) - Province di Modena e Reggio Emilia. CD-Rom a cura di Regione Emilia Romagna, Gruppo Nazionale di Difesa dei Terremoti e Istituto di Ricerca sul Rischio Sismico.

- Dogliani F., Petrini V., Moretti A. (1994) - Le chiese e il terremoto, ed. LINT, Trieste.
- Magenes G., Bracchi S., Graziotti F., Mandirola M., Manzini C.F., Morandi P., Palmieri M., Penna A., Rosti A., Rota M., Tondelli M. (2012) - Rapporto preliminare sul rilievo dei danni alle strutture in muratura dopo i terremoti dell'Emilia del maggio 2012.
- Chioccarelli E., De Luca F., Iervolino I. (2012) - Preliminary study of Emilia (May 20th 2012) earthquake ground motion records V2.1, available at <http://www.reluis.it>.
- Podestà S., Scandolo L. (2012) - Affidabilità delle catene metalliche nell'edilizia storica. Progettazione Sismica, vol. 1; p. 67-78, ISBN: 978-88-6198-071-6.
- Cattari S., Degli Abbatì S., Ferretti D., Lagomarsino S., Ottonelli D., Rossi M., Tralli A. (2012) - The seismic behaviour of ancient masonry buildings after the earthquake in Emilia (Italy) on May 20th and 29th, 2012. *Ingegneria Sismica*, Anno XXIX – N. 2-3 – aprile-giugno 2012, pag. 87 - 119.
- Decanini L.D., Liberatore D., Liberatore L., Sorrentino L. (2012) - Preliminary Report on the 2012, May 20, Emilia Earthquake, v.1, <http://www.eqclearinghouse.org/2012-05-20-italy-it/>
- Magenes G., Bracchi S., Graziotti F., Mandirola M., Manzini C.F., Morandi P., Palmieri M., Penna A., Rosti A., Rota M., Tondelli M. (2012) - Rapporto preliminare sul rilievo dei danni alle strutture in muratura dopo i terremoti dell'Emilia del maggio 2012, v.1, <http://www.eqclearinghouse.org/2012-05-20-italy-it/>.
- Italian Seismic Instrumental and parametric Data-base (ISIDe), <http://iside.rm.ingv.it>.
- Di Croce M., Di Ludovico M., Di Sarno L., Fico R., Longo A., Magliulo G., Manfredi G., Prota A. (2012) - Terremoto dell'Emilia: report preliminare sui danni registrati a Pieve di Cento (BO), Camposanto (MO), Medolla (MO) e Crevalcore (BO) in seguito agli eventi sismici del 20 e 29 maggio 2012: Rilievi e Verifiche di Agibilità del 30 e 31 maggio 2012.
- Paupério E., Romão X., Tavares A., Vicente R., Guedes J., Rodrigues H., Varum H., Costa A. (2012) - Survey of churches damaged by the 2012 Emilia-Romagna earthquake sequence. Faculty of Engineering of the University of Porto and University of Aveiro, Portugal. Available at https://dl.dropbox.com/u/8147292/FEUP-UA_Emiliana-Romagna_earthquake_report.pdf.
- Lai C.G., Bozzoni F., Mangriotis M.D., Martinelli M., Scandella L., Dacarro F. (2012) - Geotechnical aspect of May 20, 2012 M5.9 Emilia earthquake, Italy.