

# Analisi del comportamento di alcuni edifici di culto in Valnerina a seguito dei sismi del 2016

**Antonio Borri, Romina Sisti, Giulio Castori, Marco Corradi**  
Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Ingegneria, Perugia.

**Alessandro De Maria**  
Regione Umbria, Servizio Rischio Sismico, Perugia.



*La Chiesa di San Salvatore a Campi di Norcia (PG) dopo gli eventi sismici del 2016 (foto tratta da un video dell'Ing. R. Vetturini).*

## **SOMMARIO**

L'articolo propone alcune riflessioni sulle perdite di beni culturali subite con gli eventi sismici del 2016 nel Centro Italia esaminando tre casi emblematici di crolli di chiese della Valnerina.

Ciò che colpisce di più in queste vicende è l'assenza di una qualsiasi politica di prevenzione, negli anni passati, da parte degli Enti preposti alla tutela di questi beni.

La non previdenza e la non curanza nei confronti dei pur evidenti problemi strutturali di questi edifici di culto, sia dopo il sisma del 1979 che dopo quello del 1997, è aggravata, in due dei casi esaminati, dall'esistenza di importanti ed approfondite ricerche, condotte nei primi anni 2000, che avevano chiaramente denunciato la criticità di tali situazioni.

## **PAROLE CHIAVE**

SISMA CENTRO ITALIA 2016, CROLLI CHIESE, VALNERINA, PREVENZIONE, BENI CULTURALI

## **INTRODUZIONE**

Molti dei crolli delle chiese della Valnerina, avvenuti negli eventi sismici del 2016, sono caratterizzati da meccanismi di ribaltamento della facciata facilitati dall'assenza di elementi di trattenuta e/o dalla mancanza di collegamenti efficaci tra facciata, coperture e pareti perimetrali e dalle spinte esercitate da volte ed archi posti all'interno di tali edifici.

In alcuni casi, molto particolari, i crolli sono associati a fattori esterni, come il costone ed il campanile caduti sulla chiesa di Sant'Eutizio a Preci (PG) o la torre campanaria rovinata sulla Basilica di S. Benedetto a Norcia.

In altri casi sono state le dimensioni rilevanti delle specchiature perimetrali, in rapporto al loro spessore ed unitamente alle particolarità tipologiche degli edifici di culto, a causare la disgregazione delle parti apicali delle pareti, con conseguente crollo delle coperture (pur leggere). La ex chiesa di S. Francesco, a Norcia e quella di S. Agostino, sempre a Norcia, sono esempi significativi di questo tipo di problematica, e con tali dimensioni, oggettivamente, i crolli sarebbero stati difficilmente prevenibili, se non con interventi importanti ed invasivi (costolature, speroni esterni) in grado di ridurre le snellezze delle pareti.

Le chiese crollate nell'area del cratere sono centinaia e, almeno in certe zone (ved. ad esempio Norcia o Campi di Norcia) sono state tra le poche costruzioni crollate del tutto.

Per le tre chiese qui esaminate, S. Salvatore, S. Andrea e S. Maria di Piazza, tutte a Campi di Norcia (PG), la causa dei crolli avvenuti con le scosse del 26 ottobre 2016 e del 30 ottobre 2016 è infatti facilmente correlabile alla mancata attenzione nei confronti dei problemi strutturali di queste costruzioni, che avrebbero potuto essere mitigati con interventi semplici, economici e ben poco invasivi.

Come verrà illustrato nell'articolo, per S. Salvatore e S. Andrea sarebbero state necessarie (e forse sufficienti) delle catene disposte ad assorbire le spinte delle volte sulle facciate ostacolandone così il ribaltamento; per S. Maria di Piazza, oltre agli incatenamenti era urgente ed indispensabile soccorrere un singolo pilastro in breccia, gravato da oneri manifestamente non commisurati alle sue possibilità.

Nessuno può dire con certezza se realizzando quei provvedimenti le chiese si sarebbero salvate; ma sicuramente, intervenendo preventivamente, il loro livello di sicurezza sarebbe aumentato in modo molto rilevante.

Nel passato recente sono state spese cifre consistenti per il restauro degli affreschi contenuti in alcune delle tre chiese analizzate (ovvero per la loro "messa in sicurezza", secondo il lessico usato nelle Soprintendenze per tali operazioni) ora, dopo i crolli causati dai sismi dell'ottobre 2016, si spenderanno somme ingenti per tentare di recuperare frammenti di beni purtroppo perduti per sempre.

## **CAMPI DI NORCIA (PG)**

Campi è una frazione di Norcia suddivisa in due centri abitati: Campi Basso, che oggi è un'area residenziale di epoca recente, e Campi Alto, che sorge su un versante del Monte Macchialunga e si sviluppa all'interno delle antiche mura che delimitavano un castello medioevale del XIII sec.

Il paese si trova nella Val Castoriana, che si estende fra il Comune di Norcia ed il Comune di Preci, lungo il corso del fiume Campiano. Tutta la valle è caratterizzata da un elevato numero di chiese, eremi e monasteri, essendo diventata, sin dal V sec d.C., luogo di preghiera e di isolamento, per la diffusione della pratica di vita eremitica, introdotta prima da Santo Spes e poi da Sant'Eutizio [1].

Si pensi che solo a Campi Alto ai primi del 1700 c'erano sette chiese e un monastero. Dopo i terremoti del 1700 ne erano rimaste tre: S. Maria di Piazza, S. Andrea e Madonna delle Grazie. Con i sismi del 2016 anche queste tre chiese sono state distrutte.

L'abitato di Campi Alto è caratterizzato da costruzioni disposte su una serie di terrazzamenti concentrici delimitati da strade raccordate da brevi rampe di scale. Come detto, all'interno delle mura, prima dei sismi del 2016, erano presenti tre chiese (Figura 1) e due di queste (S. Andrea e S. Maria di Piazza) saranno esaminate nel presente lavoro.



(a)



(b)

Figura 1. (a) Mappa catastale di Campi Alto di Norcia. Evidenziate in rosso le tre chiese all'interno delle mura del castello. (b) Foto di Campi Alto prima dei sismi del 2016.

Per questi due casi molte informazioni sono state tratte da una serie di ricerche condotte nel periodo 2000-2004 da un gruppo composto dal Politecnico di Milano (che aveva come responsabile la compianta Prof.ssa Luigia Binda), dall'Università di Padova (con responsabile il Prof. Claudio Modena), e dal MiBACT stesso, con Responsabile l'Ing. Luciano Marchetti, che in quel periodo rivestiva il ruolo di Commissario delegato per i Beni Culturali nella Regione Umbria.

Lo studio, molto accurato ed approfondito, era stato condotto nell'ambito del progetto quadro triennale 2000-2002 del Gruppo Nazionale per la difesa dai terremoti (GNDT) operante all'interno della struttura dell'INGV. In [2], [4] e [6] si può trovare una sintesi scientifica del lavoro svolto.

Erano state svolte anche tesi di laurea (ved. ad es.: [3]) e una tesi di dottorato, quella dell'Arch. Giuliana Cardani [5], un lavoro metodico e rigoroso, che riporta in modo completo e con dovizia di particolari le operazioni svolte in quel periodo, insieme ai risultati trovati.

Molti sono stati anche gli articoli scientifici presentati da quel gruppo, sia in convegni che su riviste: nel già citato report finale del 2004 [2] se ne contano ben quindici.

Oltre all'Ing. Marchetti del MiBACT era presente nel gruppo di ricerca anche l'Arch. Margherita Guccione, anche lei del MiBACT, come co-responsabile di due task: "Valutazioni in relazione al valore storico/artistico/monumentale dei manufatti" e "Individuazione di linee guida per la riparazione e il miglioramento sismico".

Tali studi avevano permesso di raggiungere una conoscenza accurata, attendibile e qualificata sulla criticità della situazione strutturale dei manufatti analizzati, ma i risultati ottenuti non sono stati poi utilizzati per eliminare o ridurre le problematiche riscontrate e mettere in sicurezza quelle chiese. A tanto lavoro di ricerca infatti non è seguito alcun intervento.

Indubbiamente non è stato il primo caso, né sarà l'ultimo, in cui ricerche scientifiche ben fatte rimangono inutilizzate. In questo caso, però, tale disinteresse ha portato ad avere danni gravissimi ed irreparabili.

### CHIESA DI SANTA MARIA DI PIAZZA

La chiesa di Santa Maria di Piazza, inizialmente intitolata a Santa Maria della Misericordia, venne fondata nel 1351. Nel corso dei secoli fu colpita da numerosi terremoti, e per questo fu più volte restaurata e rimaneggiata.

La chiesa occupava il piano terra di una porzione di aggregato affacciante su via Graziosa (Figura 2a) e si distingueva dalle abitazioni ordinarie adiacenti per la presenza di un campanile a vela e di un portale trecentesco con ghiera a fogliame, sormontato dall'agnello crucifero, simbolo dell'Ordine benedettino (Figura 2b).

Analogamente agli altri edifici di Campi Alto, l'edificio che ospitava la chiesa di Santa Maria di Piazza si sviluppava su più livelli (in genere tre, ma in questo caso due nell'edificio di destra e tre in quello di sinistra) il piano terra si trovava a quota della strada di valle, uno intermedio e il terzo a livello della strada di monte.

La chiesa era costituita da un'unica ampia aula rettangolare, suddivisa in tre navate coperte con volte a botte in pietra, di differenti altezze e dimensioni, fra loro separate da due arcate con un unico pilastro centrale (Figura 2c).



L'accesso dal piano stradale era possibile attraverso i due portali sulle navate laterali, mentre una finestra lunettata si apriva sulla navata centrale.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2. (a) Posizione della chiesa nell'aggregato. (b) Portale trecentesco di accesso alla chiesa su Via Graziosa. (c), (d) L'ampio ambiente della Chiesa diviso in tre navate coperte da volte a botte, in pietra. Da notare le arcate, su cui si scaricano le volte a botte, che dividono le navate: le spinte degli archi terminali, mancando gli incatenamenti, vanno a spingere la facciata. Da notare anche le ridotte dimensioni dell'esile pilastro in breccia della arcata che divide le navate di destra (da [7]).

La chiesa conservava buona parte dei decori e degli affreschi del XV e XVI sec.: la volta della navata centrale era affrescata con sei episodi della storia di S. Gioacchino e S. Anna, genitori di Maria, e la vita della Vergine Maria, descritti da didascalie in vernacolo. Gli affreschi, realizzati dalla bottega degli Sparapane, erano molto apprezzati per la vivacità dei colori e i dettagli dei disegni come i copricapi, la decorazione degli abiti e le ricche architetture gotiche (Figura 3a). Sulla volta a botte della navata di destra erano rappresentati episodi della Passione di Cristo ed almeno cinque tondi di schema giottesco. Nei sottarchi erano affrescati i profeti, mentre a fianco dell'ingresso di destra c'era un angelo trecentesco ed altri frammenti pittorici. Sulla parete di controfacciata erano presenti degli affreschi scoperti dopo il terremoto del 1979, fra i quali Sant'Antonio Abate, patrono degli allevatori, accompagnato da un maiale nero, Sant'Amico, patrono dei boscaioli, con un lupo al guinzaglio e la Madonna della Misericordia (Figura 3b). Gli affreschi della chiesa erano stati restaurati di recente (presumibilmente nel 2008).

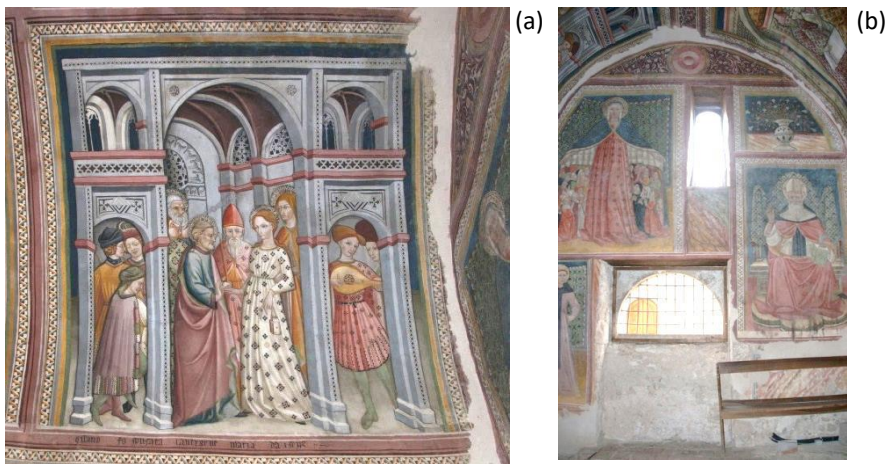


Figura 3. (a) Particolare degli affreschi della navata centrale. (b) Affreschi sulla controfacciata (da [7]).

Come detto in precedenza, nell'ambito dello studio [2] l'aggregato era stato rilevato ed esaminato in dettaglio. I disegni, ricavati da [5], sono stati qui integrati con le informazioni dedotte da quanto osservato in occasione del sopralluogo effettuato il 16 settembre 2016 per valutare i danni causati dal sisma del 24 agosto 2016. L'insieme delle informazioni raccolte ha permesso di conoscere la geometria della maggior parte degli elementi strutturali, le tipologie murarie, le tipologie di orizzontamenti e la loro orditura (Figura 4a).

La chiesa occupava il piano terra di due edifici adiacenti. L'edificio di destra, addossato ad una torre sulla cui sommità spiccava il campanile a vela, si sviluppava su due livelli; quello inferiore, occupato dalla chiesa, non era stato interessato da interventi strutturali. Il livello superiore (e solo lui!) era stato consolidato dopo il sisma del 1979 con iniezioni; aveva una copertura con tre capriate lignee poggianti sulle pareti longitudinali, con arcarecci e orditura secondaria in legno, pianelle e soletta di completamento in calcestruzzo armato con rete elettrosaldata. Su questo edificio di destra erano visibili (dalle foto reperite) quattro capochiave, disposti a livello del solaio intermedio. Gli arcarecci, come si vede da quanto resta di loro nella Figura 7e, erano stati inseriti nel muro della costruzione confinante di destra, ovvero nella torre (poi crollata) e nella parte ad essa retrostante (rimasta in piedi e visibile, come detto, nella Figura 7e).

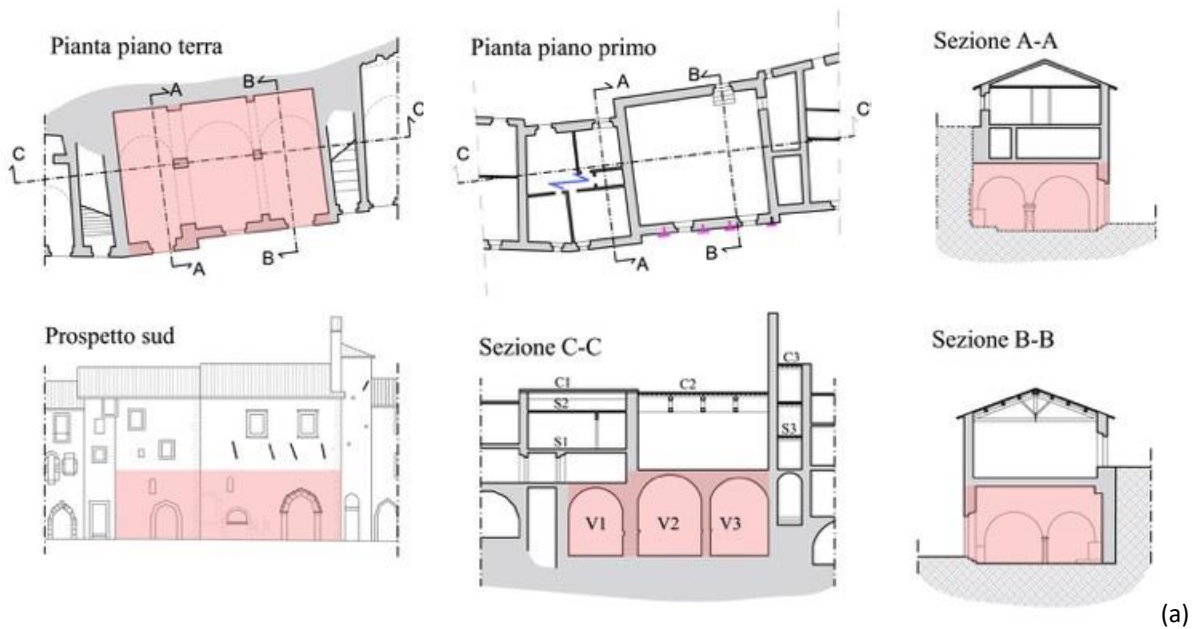
L'edificio a sinistra di cui la chiesa occupava solo una porzione, aveva la facciata sporgente rispetto all'edificio di destra prima descritto. Si sviluppava su tre livelli, con solaio intermedio e copertura in latero cemento orditi entrambi parallelamente alla facciata. Era inoltre presente un controsoffitto realizzato con travi in ferro e tavelloni. Sulla facciata di questa porzione di fabbricato non erano presenti incatenamenti.

Tra gli elementi palesemente più vulnerabili della chiesa c'era il pilastro centrale di destra (Figura 2d e Figura 5a), dalle dimensioni molto modeste e realizzato in un unico blocco di breccia, pietra con problematiche meccaniche (a causa anche della porosità) ben note. L'elemento era stato studiato in [5] effettuando il rilievo dello stato fessurativo, caratterizzato da lesioni verticali ed espulsione di materiale, con prove ultrasoniche che avevano confermato la presenza di lesioni profonde.

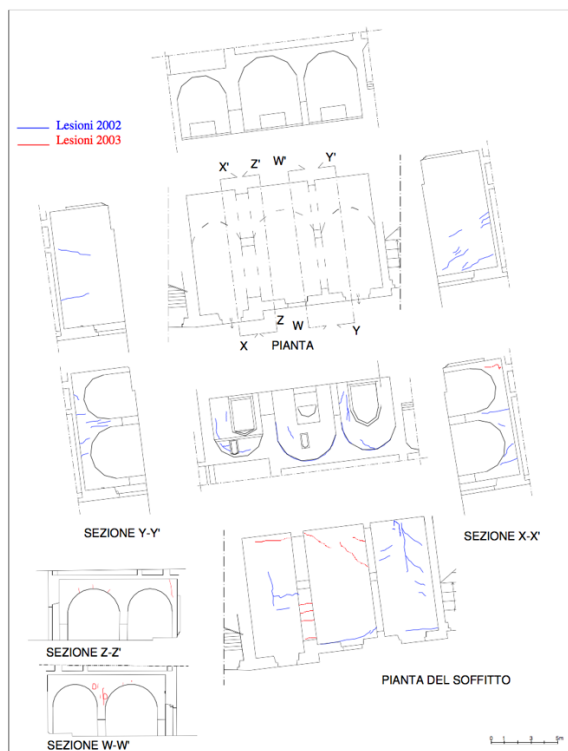
In [5] ed in [6] erano riportate le conclusioni delle indagini. In [5] si legge che l'unità immobiliare in questione *"..è stata adeguata solo al primo piano, dove oggi è la sala consiliare, mentre al piano terra, destinato a chiesa, non vi sono interventi di recente fattura: la mancanza di manutenzione, i terremoti subiti e l'ulteriore appesantimento del piano sovrastante apportato dai consolidamenti rendono oggi questo manufatto in una situazione molto critica, testimoniata dalla gravi lesioni interne che riguardano soprattutto le volte. A tale proposito questa schiera è stata tra gli oggetti di studio affrontati in una tesi della Facoltà di Architettura del Politecnico di Milano (Relatore: Prof.ssa L. Binda) in cui vengono applicati dei metodi di calcolo (programma ISIVERS) per testare la validità dei consolidamenti effettuati. L'edificio risulta quasi interamente vulnerabile al meccanismo di resistenza a flessione per comportamento a trave, debolezza relazionabile alla mancata presenza di presidi ortogonali ai setti di spina (... ). L'iniezione di miscela di leganti non è sufficientemente in grado di portare in sicurezza la struttura, in particolar modo in risposta ai meccanismi fuori piano"*.

Inoltre, per quanto riguarda il pilastro, le indagini avevano rilevato che “.. nella parte alta del pilastro ... sono presenti molte lesioni e che queste non sono solo superficiali; si rileva anche una lesione alla base del pilastro...”.

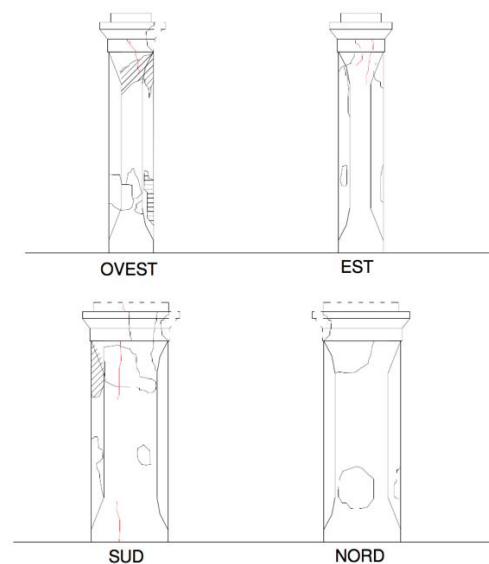
A questi segnali, già molto negativi, si deve aggiungere quanto riportato sempre in [5], ovvero che nel 2003, dopo appena un anno dal precedente rilievo, nella chiesa si erano formate nuove lesioni, sulle volte e sul pilastro in breccia della navata di destra (Figura 4b).



(a)



(b)



LEGENDA

- mancanze di materiale
- tracce di affresco
- disgregazione dopo il trattamento
- lesioni

(c)

Figura 4. (a) Pianta, prospetto e sezioni (elaborate a partire dai disegni contenuti in [5]) della porzione di schiera che ospitava l'ambiente della chiesa di Santa Maria di piazza (campita in rosso). (b) Variazione del quadro fessurativo tra il 2002 ed il 2003 (da [5]). (c) Quadro fessurativo sul pilastro in breccia della navata di destra (da [5]). Da qui si poteva facilmente comprendere lo stato di pressoflessione, giunto ad uno stadio piuttosto avanzato, del pilastro: lo spigolo sud-ovest, nella parte superiore, tendeva ad essere espulso, mentre sulla faccia nord non erano presenti lesioni da schiacciamento.



Da considerare poi, stante anche l'esito finale, quanto scritto sempre in [5], relativamente alla U.I. 184 (la cella muraria adiacente alla chiesa, quella con la torre e il campanile a vela) per la quale “.. per le dimensioni i setti a vari livelli risultano non verificati ai cinematismi di ribaltamento”.

Le conclusioni riportate in [6] appaiono assolutamente chiare e coerenti con l'importante lavoro fatto da quel gruppo di ricerca: “L'indagine condotta dalle tre UR, ben coordinate tra loro, ha permesso di raccogliere una grande quantità di dati su: - storia ed evoluzione degli edifici e dei centri studiati - caratteristiche tipologiche degli edifici, delle strutture e dei materiali - danni e interventi dopo il 1979 e danni dopo il 1997 - efficacia delle riparazioni dopo il 1979 - possibili meccanismi di danno degli edifici riparati e non riparati in futuro. I dati sono stati utilizzati per eseguire verifiche degli edifici mediante il programma Vulnus e definirne la loro vulnerabilità oltre che a prevedere opportune tecniche di intervento”.

Nonostante i risultati emersi, l'autorevolezza degli autori e la presenza diretta e la competenza istituzionale degli Enti coinvolti (MiBACT in primis) nessun intervento poi è stato fatto.

La chiesa aveva comunque superato il sisma del 24 agosto 2016 senza subire danni rilevanti. Durante un sopralluogo, effettuato il 16 settembre 2016, era stato osservato il danneggiamento del campanile a vela (Figura 5b) ed una lesione di distacco della volta (indicata con V1 in Fig. 4a) dalla parete di facciata (Figura 5c). Il pilastro centrale non presentava aggravamenti rispetto allo stato fessurativo sopra descritto.

Da un video girato subito dopo le scosse del 26 ottobre 2016 si può notare una lesione verticale (Figura 6) in corrispondenza della parete perimetrale di destra della chiesa, ad indicare l'attivazione del meccanismo di ribaltamento della facciata, frenato dalla presenza degli incatenamenti presenti su questa porzione di aggregato.

Una delle scosse del 30 ottobre 2016 ha poi causato il crollo dell'intero aggregato occupato dalla chiesa e della torre adiacente (Figura 7).



(a)



(b)



(c)

Figura 5. Danneggiamenti e vulnerabilità riscontrate a seguito del sisma del 24 agosto 2016. (a) Pilastrino centrale. (b) Lesioni sul campanile a vela. (c) Lesione di distacco della volta della navata di destra.



Figura 6. Lesioni sulla facciata della Chiesa di Santa Maria di Piazza subito dopo le scosse del 26 ottobre 2016 e prima del sisma del 30 ottobre 2016. Immagine estratta da un video disponibile sul sito [www.perugiatoday.it](http://www.perugiatoday.it).

Difficile individuare quale, delle diverse e gravi vulnerabilità evidenziate dallo studio prima citato, e dalle analisi da noi successivamente compiute, sia la maggiore responsabile del crollo.

L'esile pilastro, già fessurato a pressoflessione, è certamente in prima posizione in questa rosa di candidati, specie se si va a calcolare, come qui è stato fatto, la tensione di compressione nello stato di pressoflessione che lo impegnava già in fase statica.

Basta considerare i carichi verticali che gli provenivano dalle volte e dalle arcate, e le spinte derivanti dalle loro asimmetrie, per trovare valori di tensioni oltre i 20 MPa, già prossimi, anche senza il sisma, a quelli di rottura (28 MPa) trovati per quel tipo di materiale ([5]). Essendo quel pilastro già fessurato e molto snello è facile presumere che il sisma del 30 ottobre 2016 ne abbia provocato il collasso a causa di una pressoflessione che era già ad uno stadio avanzato. Nella Figura 4c si possono notare le lesioni di schiacciamento sulla faccia sud del pilastro, e l'incipiente tendenza all'espulsione del suo spigolo sud-ovest, nella parte superiore, lesione coerente, peraltro, con la progressione del quadro fessurativo sulle volte tra il 2002 e il 2003 [5], associabile con un incremento di rotazione verso l'esterno della facciata dell'edificio di sinistra.

Ma il crollo potrebbe essere iniziato proprio con il ribaltamento di questa facciata, molto snella, non tirantata e con una consistente spinta orizzontale – quella dell'arcata che divideva le due navate di sinistra - presente anche in fase statica. Peraltro, l'orditura dei solai in questo edificio era parallela alla facciata e quindi non c'era alcun contributo al trattenimento della parete. Su quell'arcata, oltre ai carichi che le arrivavano dalle volte della chiesa, gravava il muro di separazione tra i due edifici, molto spesso, e con esso si scaricava lì anche il peso dei solai orditi parallelamente alla facciata.

La spinta dell'arco sulla parete interna della facciata, pur essendo ad una quota non elevata, era quindi molto rilevante.

Terzo possibile elemento scatenante del collasso potrebbe essere stato il ribaltamento della adiacente torre (U.I. 184), molto snella e già valutata non verificata al ribaltamento nella ricerca di cui sopra. Gli arcarecci della copertura dell'edificio di destra, conficcati nella parete muraria della torre (lungi da poter costituire un ritegno efficace al movimento della torre stessa) potrebbero essere stati trascinati in quel ribaltamento, portando ad un collasso progressivo dell'intero aggregato.

Difficile dire quale dei tre o quale combinazione tra di loro sia stato l'elemento decisivo. Non si può escludere nemmeno che ad innescare un collasso di tipo progressivo sia stato anche solo il crollo del campanile a vela sulla sottostante copertura e certamente occorre evidenziare che la qualità scadente della muratura può aver contribuito a causare tali crolli.

La cosa sicura, al di là di ogni ragionevole dubbio, è che il collasso della chiesa di Santa Maria di Piazza, senza interventi, era assolutamente prevedibile, ed infatti era stato chiaramente e correttamente previsto nella ricerca più volte citata.





(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 7. Crollo avvenuto con il sisma del 30 ottobre 2016. (a) Crollo della porzione di schiera che comprendeva la chiesa di Santa Maria di Piazza vista da Via Graziosa (quella a valle). (b) Vista da via Entedia (quella a monte): ecco quanto resta della abitazione adiacente alla chiesa (alla sua sinistra) caratterizzata da una copertura (indicata con C1 in Fig. 4a) ed un orizzontamento intermedio (S1 di Fig. 4a) in latero-cemento, con orditura parallela allo sviluppo longitudinale della schiera. (c) Vista da via Entedia (monte): copertura lignea (C2 di Fig. 4a) dell'edificio di destra, costituita da tre capriate lignee poggianti sui muri longitudinali, arcarecci e orditura secondaria in legno, pianelle e soletta in calcestruzzo. (d) vista da Via Graziosa (valle): porzione della costruzione che si trovava sul retro della torre adiacente alla chiesa. (e) Vista da via Entedia (monte): in primo piano la copertura (crollata) dell'edificio di destra dell'aggregato che ospitava la chiesa. Sullo sfondo, con l'intonaco bianco, la costruzione che era dietro alla torre crollata.

Da notare quanto resta degli arcareggi inseriti nella parete di tale costruzione. Evidentemente anche per l'altra falda si aveva questa situazione, cioè gli arcareggi erano inseriti nel muro della torre (e quindi ne hanno seguito il destino..).

Peraltro, anche negli anni precedenti erano disponibili strumenti, anche molto semplici, che potevano mettere in guardia chi aveva competenza e responsabilità sulla tutela di questo bene.

Valga per tutti la semplice verifica dei cinematici "alla Giuffrè", usuale negli anni '80-'90, consistente semplicemente nel confrontare il moltiplicatore di attivazione del meccanismo con un prefissato valore di riferimento, che, ai tempi di Giuffrè, era 0.28 per il sisma "forte" e 0.14 per il sisma "frequente".

Per la facciata della porzione di sinistra della chiesa, con semplici considerazioni di equilibrio si trova un valore di  $\alpha_0 = 0.056$  di gran lunga inferiore ai due valori di riferimento prima citati.

Ancora più immediata, ma non per questo meno efficace, sarebbe stata una semplice valutazione della snellezza delle murature di facciata, evidentemente a portata di chiunque: nel caso in esame avrebbe dovuto suscitare allarme (al di là della gravissima situazione del pilastro in breccia) la snellezza della parete dell'edificio di sinistra, pari a 12,4, ben superiore a quel valore, 8, indicato da Rondelet [18] come relativo a muri "stabili", con l'aggravante, in questo caso, della spinta molto consistente dell'arcata di sinistra (figura 8).

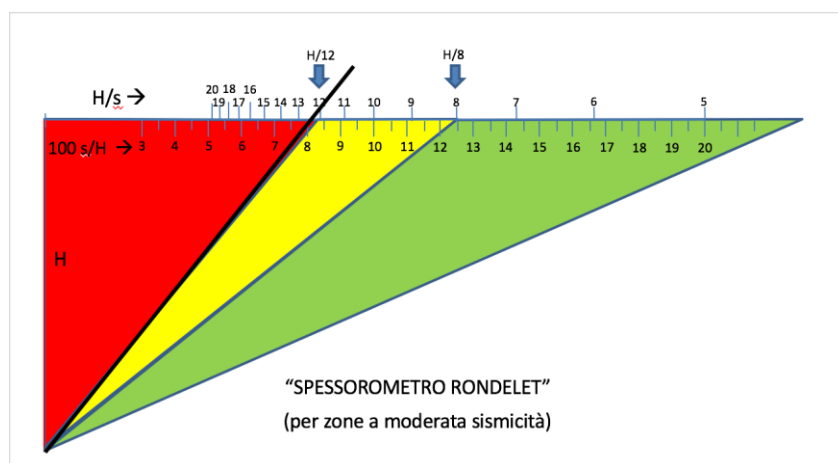


Figura 8. Snellezza della parete di facciata della chiesa di Santa Maria di Piazza e spinta degli arconi sulla stessa facciata. In basso: "spessorometro" di Rondelet applicato alla parete in questione.

Oggi, oltre a valutare con estrema attenzione le condizioni statiche del pilastro in breccia, avremmo condotto sia le analisi pushover che le analisi limite per cinematici di collasso, in modo da valutare la risposta sismica di questa costruzione. Questo è stato fatto in questa sede, evidentemente solo per riflettere su quanto avremmo potuto trovare oggi, con lo stato attuale delle conoscenze scientifiche.



L'analisi pushover, peraltro, trova qui utile fondamento nella particolare conformazione della costruzione, un edificio inserito in una schiera, con pareti interne e solai di interpiano. Gli elementi che la identificano come chiesa da un punto di vista strutturale sono il campanile (peraltro non eccessivamente alto rispetto all'edificio) e soprattutto l'impianto voltato presente al livello del terreno e la doppia altezza dei vani dell'edificio di destra.

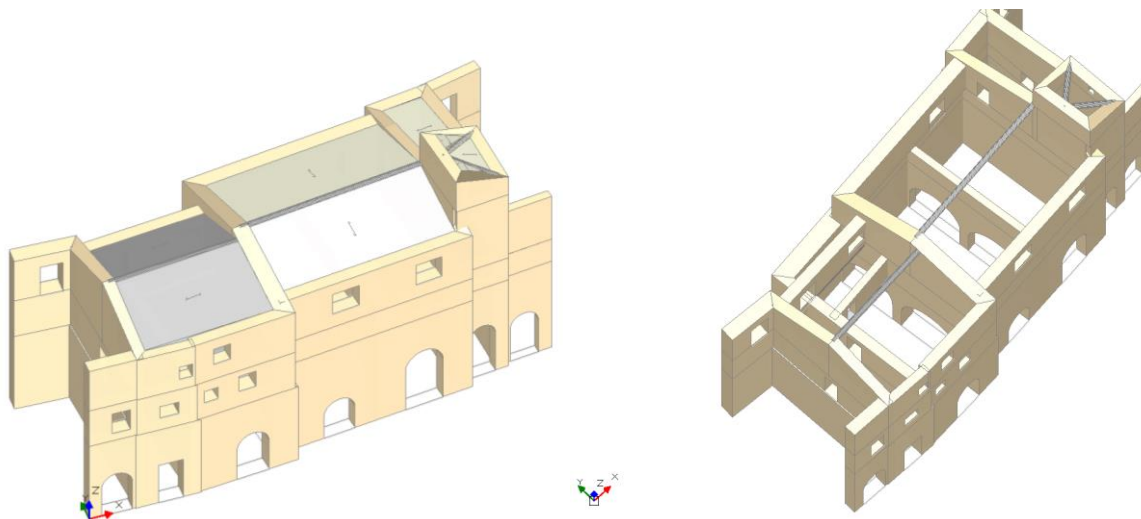


Figura 9. Modello numerico della chiesa di Santa Maria di Piazza.

L'analisi pushover è stata svolta con il software PCM Aedes su un modello a telaio come previsto dalle vigenti NTC 2008. Il punto di controllo per gli spostamenti in analisi pushover è stato considerato sulla copertura della chiesa al livello 3 (quindi non sul campanile). Le distribuzioni dell'analisi pushover sono quelle non adattive e non multimodali previste dalle NTC 2008. Visto che l'edificio è parte di una schiera, non sono stati considerati effetti torsionali globali nonostante la presenza di solai rigidi.

Il modello considera i carichi provenienti dalle cellule adiacenti secondo area di influenza ed alcune pareti degli edifici adiacenti al fine di considerare gli effetti della loro rigidità; tali pareti naturalmente sono state escluse dalle verifiche.

I solai e le coperture in laterocemento sono definiti come rigidi; le volte e i solai e le coperture in legno sono definiti come deformabili. Nessun impalcato è rigido.

Il sito, per un edificio in classe d'uso III, ha una accelerazione  $a_g$  di 0.281g ed un suolo di categoria stratigrafica B e categoria topografica T2.

Per i materiali è stato considerato un livello di conoscenza LC1 con  $FC = 1.35$  e la muratura è in pietrame disordinato senza alcun coefficiente correttivo, con i parametri meccanici tratti dalle tabelle della Circolare 617 del 2009.

Escludendo le curve di spinta dirette verso la parete rocciosa retrostante (quelle in direzione +Y secondo le figure qui riportate) si perviene a sei curve di pushover significative.

La curva con indice di rischio più basso è -Y con distribuzione uniforme di forze (gruppo 2-a secondo le NTC 2008) che sembra corrispondere alla effettiva direzione di collasso dell'edificio. Per questa curva di pushover si ha:

Indice di rischio: 0.691 ;

massima PGA sostenibile: 0.224 g.

Il tempo di ritorno del sisma allo SLV è  $T_r\text{slv} = 209$  anni che corrisponde ad una vita nominale restante (o ad un  $T_{INT}$ ) di 14.6 anni.

Notiamo anche che in direzione X (longitudinale) l'edificio, beneficiando del contrasto delle cellule adiacenti (effetto schiera) sembra avere ben pochi problemi, con indici di rischio quasi al livello dell'adeguamento.



- Asta in fase elastica
- Asta parzialmente plasticizzata
- Asta plasticizzata
- Asta collassata
- Asta in trazione/compressione eccessiva
- Asta non sottoposta a verifica

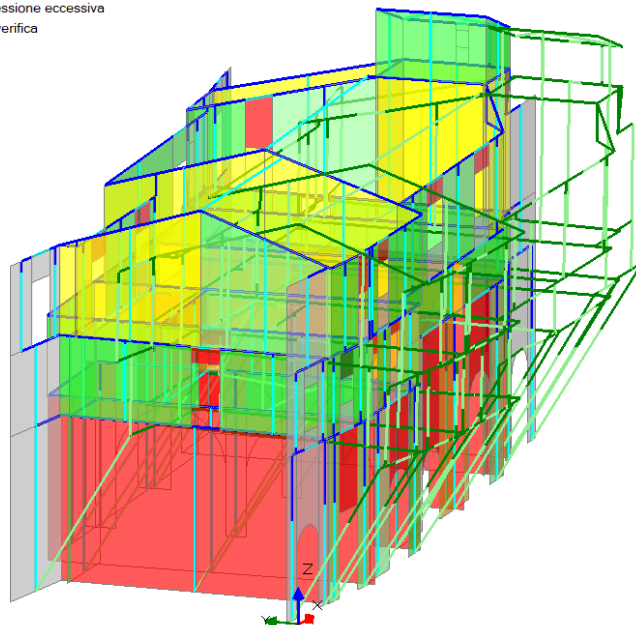


Figura 10. Combinazione E -Y con distribuzione uniforme di forze (la peggiore). IR = 0.691. Verifiche a taglio.

- Asta in fase elastica
- Asta parzialmente plasticizzata
- Asta plasticizzata
- Asta collassata
- Asta in trazione/compressione eccessiva
- Asta non sottoposta a verifica

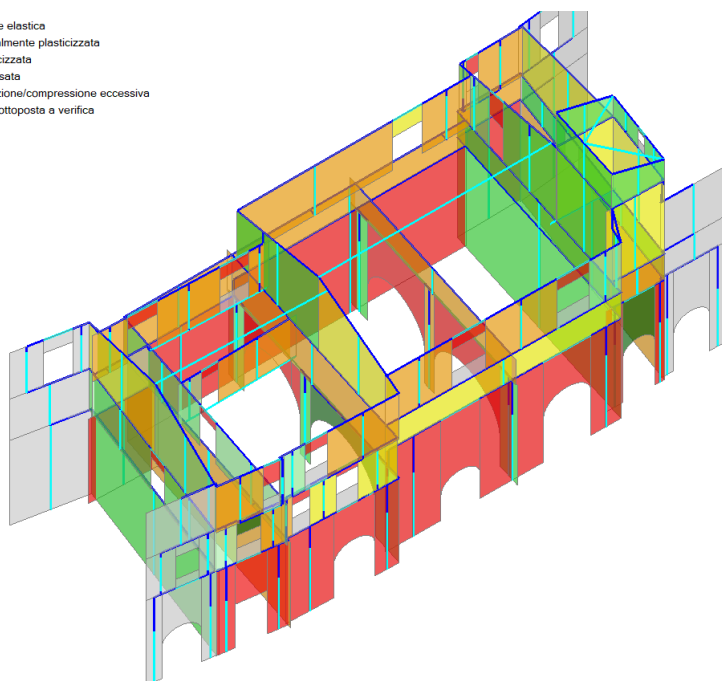


Figura 11. Combinazione -X con distribuzione uniforme di forze (IR=0.901). Verifiche a taglio.

Lo strumento principale per lo studio dei macroelementi di edifici in muratura è però l'analisi dei cinatismi. Nel caso specifico, i meccanismi locali sono stati studiati mediante analisi cinematica lineare, con fattore di struttura  $q = 2$ , condotta come spiegato nel punto C8A.4.1 della Circolare 617/2009. Il modello strutturale in questo caso è costituito da blocchi che sono ipotizzati indeformabili, che possono solo muoversi secondo cinatismi di rotazione o traslazione rigida, compatibili con i vincoli dall'esterno.

È stato definito un modello cinematico della struttura completo degli incatenamenti in acciaio ma trascurando le azioni di trattenuta esercitate dai cordoli di copertura, perché numerose osservazioni dopo vari terremoti hanno ormai mostrato con chiarezza che tali elementi, quando realizzati su murature non consolidate, esercitano una capacità di trattenuta molto limitata.

Sono state considerate le spinte di archi e volte; le cerniere non sono state arretrate.

I meccanismi di collasso analizzati si sono limitati a quelli sulla facciata dal lato di tre piani. Le catene esistenti, disposte solamente sull'edificio di destra, sono state ipotizzate di diametro 30mm, con capochiave a paletto 60cm x 6cm x 6cm.

Il tiro delle catene è stato valutato considerando i diversi dispositivi posti come capochiave e le seguenti modalità di rottura:

- snervamento sezione della catena in acciaio
- punzonamento della muratura, dipendente dallo spessore della parete su cui si ancora il capochiave
- flessione del capochiave
- penetrazione del capochiave nella muratura

Tale valutazione è stata svolta per ogni capochiave in quanto variando lo spessore della parete si ottengono diversi valori di resistenza a punzonamento ed a penetrazione.

Il coefficiente di sicurezza adottato per i materiali è  $\gamma_M$  pari a 2 (verifica sismica). Il fattore di confidenza è  $FC = 1.35$ .

Di seguito i risultati dei principali meccanismi considerati nella configurazione effettiva della chiesa e nell'ipotesi che fossero stati attuati semplici interventi di incatenamento tramite tiranti in acciaio.

L'esame di questo crollo e l'esecuzione delle analisi pushover e dell'analisi limite dei cinematicismi di collasso conduce alla conferma di alcuni concetti che ormai oggi si dovrebbero ritenere "universalmente acquisiti" da parte dei tecnici e degli addetti ai lavori (ma, purtroppo, non sempre è così), sottolineando l'importanza fondamentale delle verifiche per cinematicismi di collasso e dell'analisi della qualità muraria per edifici di questo tipo.

Tale tipologia di analisi dovrebbe essere il principale strumento per la valutazione della sicurezza per edifici antichi e per le chiese anche quando, come in questo caso, la loro tipologia costruttiva si avvicina molto a quella di un edificio.

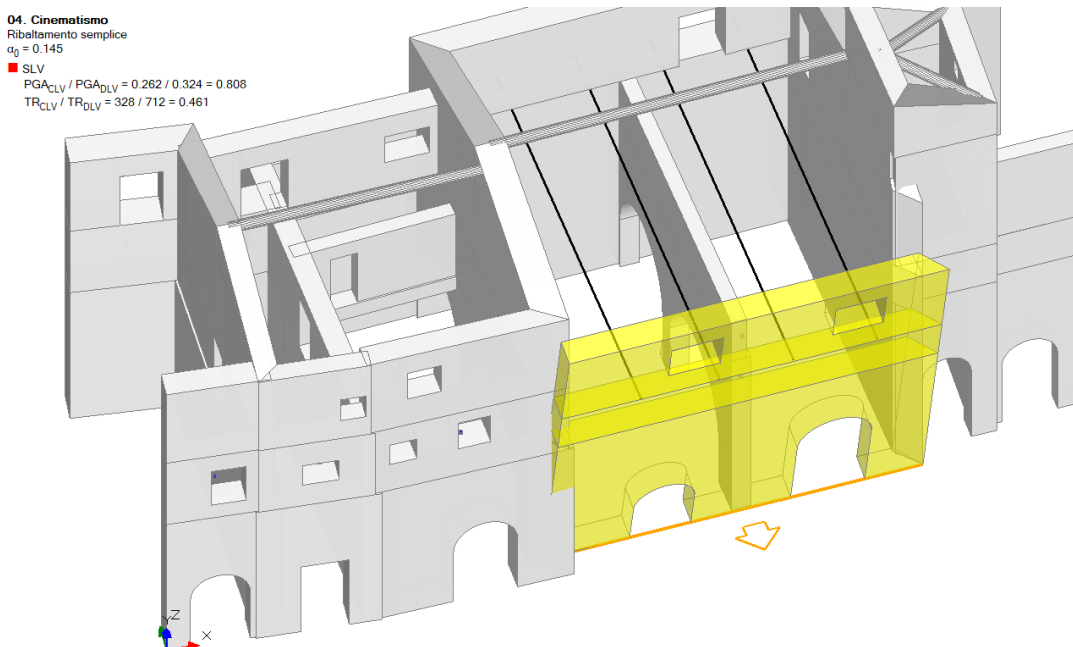


Figura 12. Ribalramento parete edificio di destra. Tale parete, trattenuta dalle catene, ribalta per un moltiplicatore dei carichi di 0.145 e quindi una PGA di 0.26g e manifesta un indice di rischio di 0.8 circa, dunque grazie alle catene non versava in condizioni critiche, seppure tali valori di capacità sono probabilmente molto inferiori al sisma registratosi il giorno 30 ottobre (crollo della chiesa).

## 02. Cinematismo

Ribaltamento semplice  
 $\alpha_0 = 0.074$

■ SLV

$$PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.136 / 0.324 = 0.419$$

$$TR_{CLV} / TR_{DLV} = 63 / 712 = 0.088$$

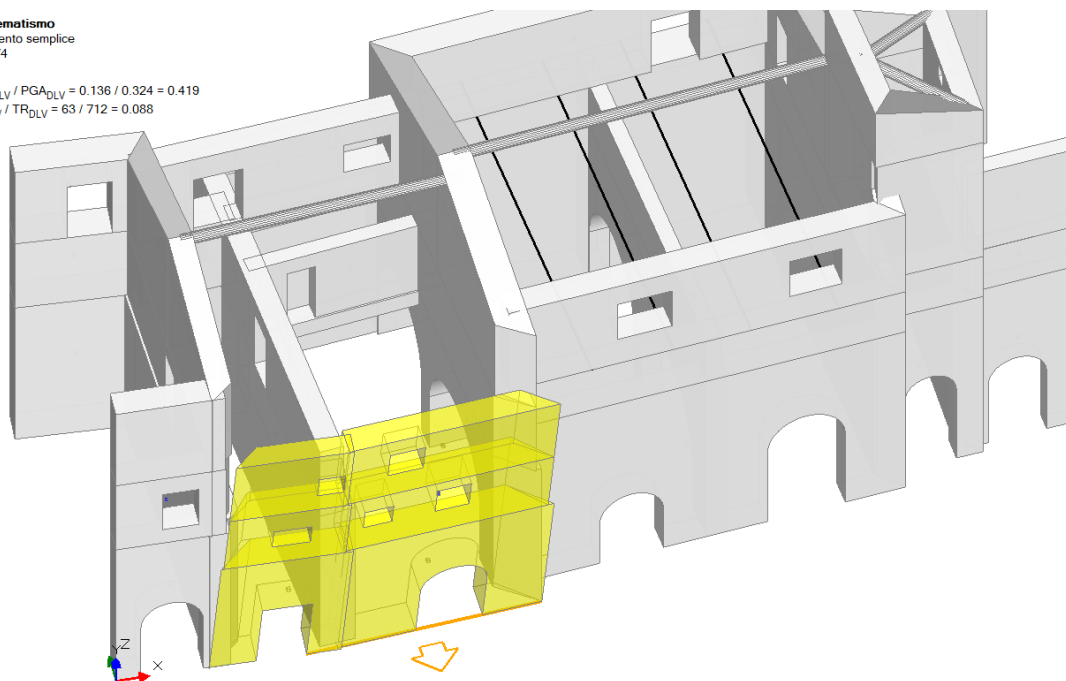


Figura 13. Ribaltamento della parete dell'edificio di sinistra. Tale parete non possiede incatenamenti e ribalta per un moltiplicatore dei carichi di 0.074 e quindi una PGA di 0.136g e manifesta un indice di rischio di 0.41 circa. Tali valori di capacità sono comunque molto inferiori al sisma registratosi il giorno 30 ottobre 2016 (crollo della chiesa).

## 01. Cinematismo

Ribaltamento semplice

$\alpha_0 = 0.191$

■ SLV

$$PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.350 / 0.324 = 1.079$$

$$TR_{CLV} / TR_{DLV} = 971 / 712 = 1.364$$

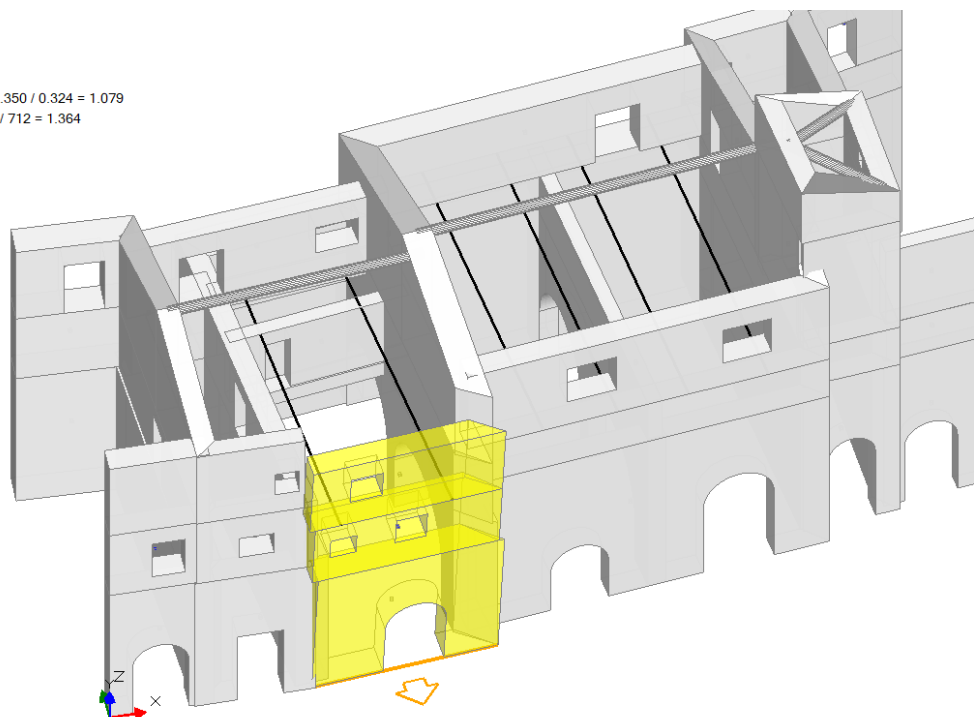


Figura 14. Ribaltamento della parete dell'edificio di sinistra nell'ipotesi di aver inserito catene in acciaio di diametro 30 mm con capochiave a piastra di diametro 400x400x25 mm. Si può notare un incremento considerevole di capacità tale da spingere il cinematismo oltre il livello dell'adeguamento. E' difficile dire se sarebbe bastato per resistere al sisma del 30 ottobre 2016, tuttavia l'incremento di resistenza è notevole e ci sarebbero state molte più possibilità di evitare il crollo per tale cinematismo.



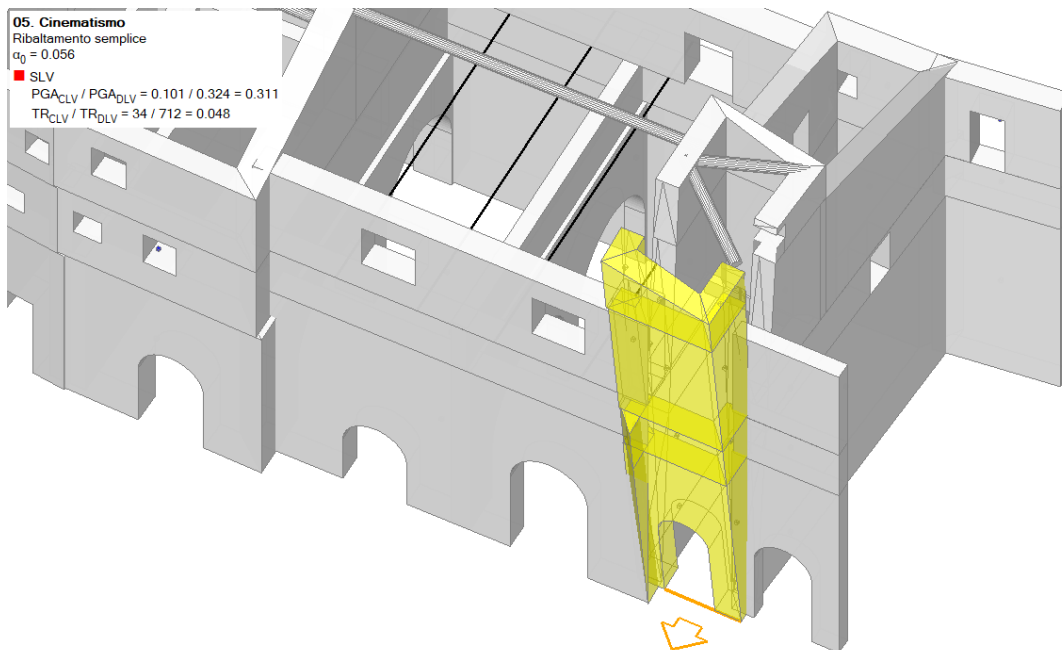


Figura 15. Ribaltamento della parete esterna del campanile. Tale parete, qui ipotizzata ribaltare con due cunei di trascinamento, ribalta per un moltiplicatore dei carichi di 0.056 e quindi una PGA di 0.101g e manifesta un indice di rischio di 0.31 circa, che risulta il più basso tra quelli trovati per la chiesa di Santa Maria di Piazza. Tali valori di capacità sono molto inferiori al sisma registratosi il giorno 30 ottobre 2016 (crollo della chiesa).

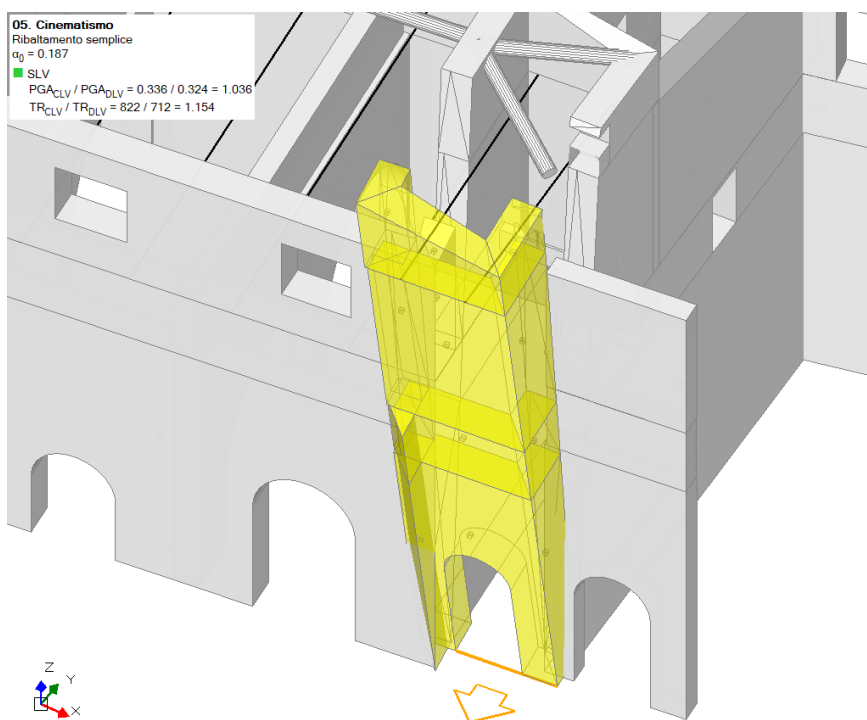


Figura 16. Ribaltamento della parete esterna del campanile nell'ipotesi di aver inserito, solamente a livello sommitale, catene in acciaio di diametro 30 mm con capochiave a piastra di diametro 400x400x25 mm. Si può notare un incremento considerevole di capacità tale da veicolare il cinematismo oltre il livello dell'adeguamento. Forse non sarebbe bastato per il sisma del 30 ottobre 2016, tuttavia l'incremento di resistenza è notevole e ci sarebbero state molte più possibilità di evitare il crollo per tale cinematismo.

## CHIESA DI SANT'ANDREA

La chiesa di Sant'Andrea sorgeva addossata alla porta di ingresso del castello di Campi Alto. Fondata nel XIV secolo, era originariamente costituita da un'unica navata, quella di sinistra, che fu poi ampliata nel Rinascimento, affiancandole la navata di destra.

Nel XVI secolo fu aggiunto il portico, con pianta triangolare prospiciente la facciata principale, caratterizzato da cinque arcate (Figura 17a) e completamente ristrutturato nel 2009 [10] sostituendo le travi di copertura [11]. Al di sotto del porticato era presente un grande fontanile.

Sulla facciata principale erano presenti due portali di accesso alla chiesa, di cui il più antico era caratterizzato da una chiave di volta con agnello crucifero e dalla presenza di due colonnine sormontate da leoni (Figura 17b). Sopra ciascuno dei due portali erano presenti dei rosoni. Al di sotto della copertura del portico erano inoltre presenti alcuni affreschi raffiguranti Sant'Andrea, il Crocefisso con il castello di Campi e San Luca, ed una epigrafe funeraria d'epoca romana.

Le due navate erano coperte con volte a crociera, a tre campate. L'abside, utilizzato come sagrestia, era separato dall'aula della chiesa con una parete lignea decorata realizzata nel 1596, sulla quale si aprivano due porticine soprastate da due teche lignee. Sopra la zona absidale si erge la torre campanaria, svettante oltre 15 m dal corpo della chiesa.

Internamente, la chiesa era pavimentata a schiappe (pietre di forma rettangolare) ed era abbellita da numerosi elementi: una cantoria con organo del 1787 posta in controfacciata fra i due portali, un'acquasantiera ovale a colonna di stile rinascimentale, un fonte battesimale a colonna, in pietra nel XVI sec, un pulpito intagliato ed intarsiato del XVI secolo della scuola dei Seneca di Piedivalle e alcuni altari dedicati a San Carlo Borromeo, a Sant'Andrea, a Sant'Antonio, alla Madonna del Rosario e al Crocefisso.

La copertura della chiesa di Sant'Andrea era stata sostituita tra gli anni '60 e '70 con una copertura a capanna costituita da travetti in c.a.p. disposti secondo la pendenza delle falde, collegati ad una trave di colmo in c.a. realizzata sopra una arcata longitudinale, e a due cordoli, sempre in c.a., realizzati sui due muri perimetrali. Dei tiranti metallici trasversali si occupavano di annullare la spinta dei travetti.

I cordoli si interrompevano in corrispondenza della facciata, che era rimasta quindi scollegata rispetto alla copertura.

Nel sottotetto, nella direzione dell'arcata longitudinale, era presente anche un'antica catena lignea (Figura 18b) disposta ad assorbire le spinte degli archi terminali e ad impedire, per quanto possibile, l'eventuale ribaltamento della facciata.

All'interno della chiesa, a livello delle imposte delle volte, non c'era invece alcun tirante e quindi le spinte dei peducci si scaricavano direttamente sulla facciata, impegnandone in particolare la parte centrale.

In [5] sono riportati il rilievo completo della chiesa (da cui è tratta la Figura 18a), i risultati di due prove con martinetti piatti doppi condotte su un muro esterno della chiesa e all'interno del campanile e l'evoluzione del quadro fessurativo dal 2002 al 2003, sia sulle volte che sui due pilastri centrali.

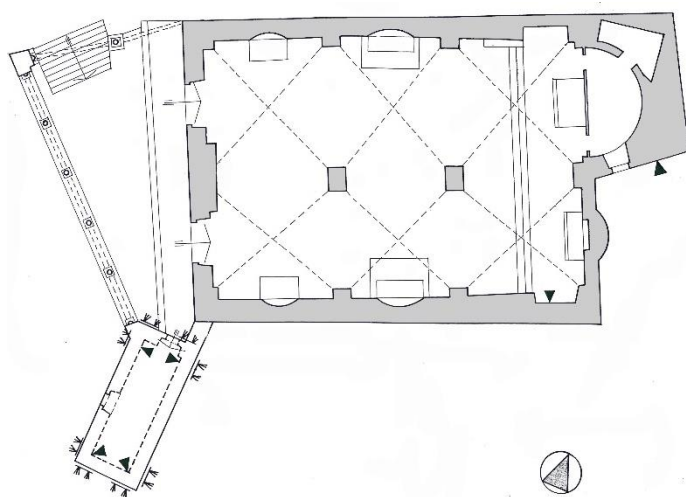


(a)



(b)

Figura 17. Chiesa di Sant'Andrea. (a) Vista del portico a cinque arcate dalla sottostante piazza. (b) L'antico portale di accesso.



(a)



(b)



(c)

Figura 18. (a) Pianta della chiesa di Sant'Andrea. (b) Vista del sottotetto, in particolare dell'arcata longitudinale centrale che riporta il peso della copertura sui pilastri centrali. (c) Sezione longitudinale (da [5]).

Durante il sopralluogo effettuato il 16 settembre 2016 per valutare i danni causati dal sisma del 24 agosto 2016 era stato osservato un quadro fessurativo importante che interessava le volte a crociera (Figura 19a) e una lesione verticale di distacco della facciata dalla parete longitudinale (Figura 19b).

In occasione di un successivo sopralluogo (il 9 ottobre 2016) è stato possibile accedere anche al sottotetto, constatando che le volte erano prive di riempimento e non erano state consolidate. Si è osservata anche una lesione sul pilastro addossato alla facciata della chiesa, formatasi immediatamente sotto la catena lignea (Figura 19c), che potrebbe essere associata alla spinta del cordolo sommitale della copertura sul timpano. Il ribaltamento della facciata è stato impedito in questa occasione dal portico, ben tirantato e strutturalmente ben organizzato, e quindi il dissesto è stato limitato alla parte più alta della facciata.

Le scosse del 26 ottobre 2016 hanno aggravato in modo rilevante la situazione, andando ad esaurire ogni possibile riserva di resistenza. In Figura 20a la parte sommitale della parete appare parzialmente disgregata, mentre in Figura 20b si nota come il ribaltamento della facciata abbia portato al limite del collasso la struttura del portico, che comunque era sin lì riuscita a fermare il ribaltamento.



E' significativo il fatto che pur derivando la facciata dall'unione di due muri realizzati in epoche diverse e pur essendo quella muratura di qualità certo non ottimale, tuttavia non si è avuta disgregazione dell'elemento murario, se non nella parte superiore del timpano, dove però tale effetto è associabile al martellamento della trave di colmo della copertura sulla facciata.

La scossa del 30 ottobre 2016 ha trovato una situazione ormai compromessa e così la facciata ed il portico sono crollati completamente (Figura 21a).

Da notare (Figura 21b) la modesta sezione della catena lignea (che infatti si è rotta) e lo sfilamento dell'apparecchiatura metallica di giunzione tra i diversi rami della catena.

In questo caso non è difficile individuare la carenza principale che ha aperto la strada al collasso: l'assenza di un efficace incatenamento longitudinale, capace di contrastare la spinta orizzontale derivante dalle pesanti volte in pietra delle due navate, e di trattenere la facciata nel suo movimento in avanti in caso di sisma.

Il portico ha svolto il suo lavoro fino in fondo, ma più di tanto non poteva certo fare. Anche la catena lignea estradossale, con trecento e più anni di servizio, ha dato tutto quello che poteva.

La spinta orizzontale delle volte in pietra non era a quella quota e comunque era ben più rilevante; tale spinta si è così sommata alle forze di inerzia derivanti dal sisma ed agenti sulla facciata e sulla copertura, ed insieme, vinta la capacità della catena lignea, hanno portato la facciata della chiesa al collasso.

Anche in questo caso, non era poi così difficile comprendere la assoluta necessità, vista la consistente spinta delle volte in pietra sulla facciata, di una catena moderna, disposta nella posizione opportuna e di efficacia meno aleatoria rispetto a quella della catena lignea (pur encomiabile, dopo ben 300 anni di servizio).



(a)



(b)

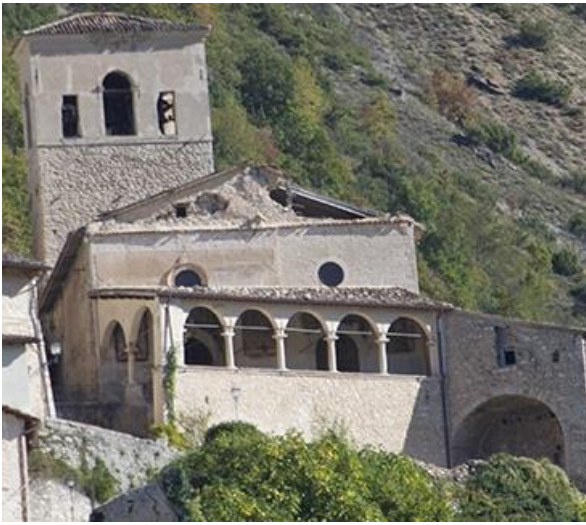


(c)



(d)

*Figura 19. Stato di danno della chiesa di sant'Andrea dopo il sisma del 24 agosto 2016. (a) Lesioni nelle volte a crociera, viste dall'interno della chiesa. (b). Lesione verticale di distacco della facciata. (c) Vista del sottotetto, in particolare del pilastro contro la facciata e della lesione su di esso formatasi poco sotto la catena lignea estradossale. (d) Foto del timpano prima della scossa del 24 agosto 2016: si noti la posizione del capochiave della antica catena lignea estradossale.*



(a)



(b)

Figura 20. Stato di danno della chiesa di Sant'Andrea subito dopo le scosse del 26 ottobre 2016 e prima del sisma del 30 ottobre 2016 (immagini reperite sul sito [www.lavoce.it](http://www.lavoce.it)). (a) Vista frontale della facciata: da notare la disgregazione del timpano della facciata. (b) Cinematismo di ribaltamento dell'intera facciata con coinvolgimento dell'antistante portico, che si era opposto, per quanto poteva, a tale movimento.



(a)



(b)

Figura 21. Stato di danno della chiesa di Sant'Andrea dopo il sisma del 30 ottobre 2016. (a) Crollo del portico e della facciata sulla sottostante piazza. Da notare il radiciamento ligneo nello spessore della parete laterale destra ed il tipo di superficie di rottura che fa pensare ad un buon ammorsamento con la facciata, cosa che non sembra esserci stata per la parete di sinistra. (b) Particolare di quanto resta dell'antica catena lignea, unico presidio (messo probabilmente nel '700) a contrastare il ribaltamento della facciata.



## Chiesa di San Salvatore

La chiesa di San Salvatore sorgeva a Campi Basso, lungo la strada che collega Norcia a Preci, ed il suo crollo è forse la perdita più grave di beni artistici nella Valnerina nei sismi del 2016.

Fondata nel XII secolo su un preesistente tempio pagano, era originariamente chiamata Pieve di Santa Maria ed era costituita inizialmente solo dalla porzione indicata in arancione in Figura 22a [20]. Nel XIV secolo venne ampliata, allungando la navata (zona campita in azzurro in Figura 22a) e venne realizzato il portale ad arco ogivale ornato dall'agnello crucifero benedettino. Alla fine del XV secolo venne realizzato un ulteriore ampliamento affiancando alla navata esistente una navata simmetrica (individuata dalla campitura verde in Figura 22a). In tal modo la chiesa assunse l'aspetto finale, caratterizzato da un'unica aula con cinque pilastri centrali, ricavati dall'antico muro perimetrale destro della cellula originaria, e da una facciata simmetrica con due portali a sesto acuto, due rosoni e una copertura a due falde. La tessitura muraria della porzione più antica è caratterizzata da una maggiore regolarità (Figura 22b).

Sui muri perimetrali erano presenti degli speroni, mentre sul retro della navata di destra, in adiacenza, sorgeva la torre campanaria, la cui costruzione venne completata nel XVI secolo.

Al centro della navata di sinistra era presente un'iconostasi, datata 1463, costituita da una loggia sostenuta da due colonne tortili ottagonali (Figura 22d) finemente affrescata da Giovanni e Antonio Sparapane e successivamente da Nicola da Siena e Domenico di Jacopo da Leonessa. Una scaletta in pietra consentiva l'accesso al loggiato, permettendo l'adorazione del Crocifisso ligneo lì esposto.

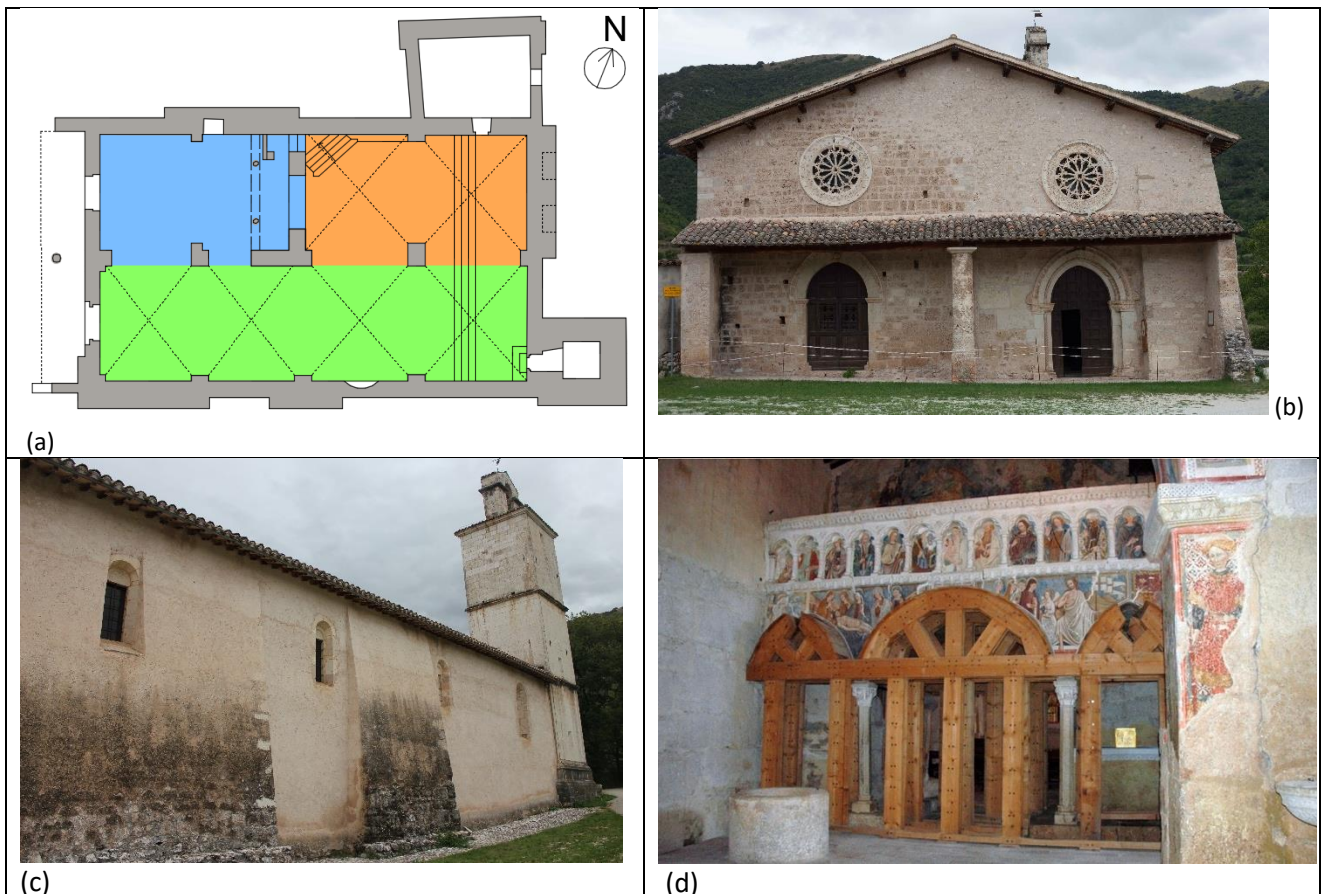


Figura 22. (a) Pianta della chiesa di San Salvatore: in arancione la porzione costruita nel XII secolo, in azzurro l'ampliamento del XIV secolo, in verde l'ampliamento del XV secolo. (b) Facciata della chiesa di San Salvatore. (c) Vista del lato destro esterno della chiesa e del campanile. (d) Iconostasi.

E' interessante osservare che sino alla fine del 1700 c'era un solo sperone [20], quello disposto a metà circa della parete Sud, gli altri vennero messi, molto probabilmente, dopo il sisma del 1859. A quel tempo, evidentemente, non avevano problemi ad intervenire aggiungendo nuovi elementi di presidio.

A seguito del danneggiamento subito per il terremoto del 1979 era stata predisposta una centinatura in legno che era poi rimasta in opera come presidio permanente.

Tutta la navata di sinistra era decorata con affreschi, fra i quali si ricorda la Crocefissione che occupava la parte di fondo del presbiterio, caratterizzata da una complessa iconografia [12]. La navata destra, invece, era priva di decorazioni pittoriche.

Il sisma del 1979 aveva provocato danni limitati alla chiesa. Oltre alla puntellazione dell'iconostasi il funzionario della Soprintendenza che si occupò del caso provvide a sostituire la copertura, mantenendola di legno (quindi senza appesantimenti), alleggerì le volte, eliminando una grande quantità di materiale sciolto (Figura 23b) che era stato lasciato sopra di esse, e fece disporre all'estradosso delle volte una leggera cappa di cls (5-7 cm) armata con una rete a maglie larghe (20x20cm) risvoltata sulle pareti perimetrali.

Tali interventi, del 1981, esaurirono i fondi disponibili e le risorse che dovevano giungere immediatamente per i successivi lavori (erano stati richiesti 200 Mln di Lire per concludere i lavori strutturali, tra cui proprio gli incatenamenti) non arrivarono, se non dopo vari anni, e quando arrivarono non vennero comunque impiegati per lavori previsti, *"... dimostrando l'assoluto disinteresse delle Amministrazioni preposte nei confronti delle problematiche strutturali della costruzione"* [15].

I fondi arrivati con la programmazione triennale 1986-88 vennero infatti assegnati per gli interventi sugli affreschi, sotto la voce: "interventi di messa in sicurezza degli affreschi" (!). Questo restauro pittorico durò vari anni.

Evidentemente, il problema sismico in Valnerina era ormai passato in secondo piano.

La carenza strutturale più grave per la chiesa, cioè la mancanza di catene capaci di assorbire la spinta delle volte e di evitare il ribaltamento della facciata, era quindi rimasta.

Si comprende così come mai il sisma del 24 agosto 2016 (con epicentro peraltro non vicinissimo a Campi) abbia gravemente danneggiato proprio la zona più vicina a tale parete. Durante il sopralluogo effettuato il 16 settembre 2016 erano state rilevate alcune lesioni che interessavano i primi tre pilastri dell'arcata che divideva le navate (Figura 24). Sul primo pilastro (quello addossato proprio alla parete di facciata) erano presenti lesioni verticali che mostravano la mancanza di ammorsamento con la parete e una lesione orizzontale che indicava la formazione di una cerniera proprio a causa della spinta delle volte sulla facciata.

L'iconostasi risultava gravemente danneggiata, con una porzione del parapetto della loggia prossima al crollo per ribaltamento (Figura 25a), e anche il rosone sopra il portale sinistro di ingresso presentava dei conci fortemente sconnessi (Figura 25b).

Ispezionando il sottotetto è stato possibile osservare il consolidamento estradosso delle volte, effettuato, come detto, negli anni '80 (Figura 26a). Inoltre, al di sopra delle arcate che separavano le volte a crociera le une dalle altre, erano presenti dei setti murari sui quali poggiavano le travi principali di copertura. Lo schema della copertura della chiesa di San Salvatore era quindi quello rappresentato schematicamente nella Figura 26b.





(a)



(b)



(c)



(d)

*Figura 23. Chiesa di San Salvatore: a) dal catasto gregoriano si nota come vi fosse, sino a quel momento, solo uno sperone, sulla parete Sud [20]; b) facciata della chiesa ai primi del '900 (foto archivio Sordini); c) facciata della chiesa durante i lavori successivi al sisma del 1979. Da notare come si leggeva chiaramente la stratigrafia della facciata. (d) Lavori nel sottotetto: rimozione del materiale sciolto che si trovava sopra le volte.*



(a)

(b)

(c).

Figura 24. Lesioni presenti sui tre pilastri centrali più vicini alla facciata, a seguito del 24 agosto 2016: (a) Primo pilastro, addossato alla facciata, sulla cui sommità agisce la spinta della volta a crociera. (b) Secondo pilastro. (c) Terzo pilastro adiacente all'iconostasi. Da notare qui come la spinta orizzontale della volta in fase sismica si è scaricata a terra attraverso la parete laterale dell'iconostasi.



(a)



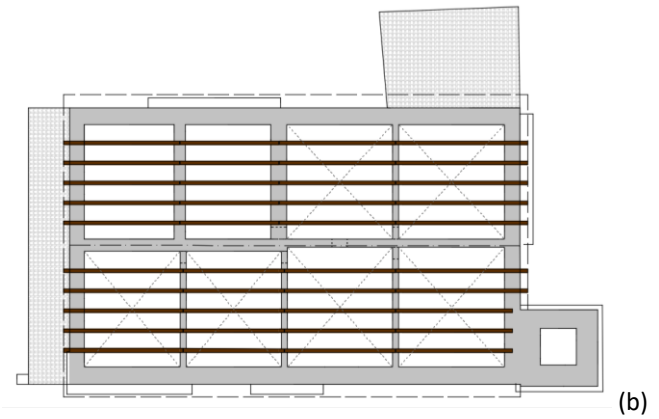
(b)

Figura 25. Stato di danno della chiesa di San Salvatore dopo il terremoto del 24 agosto 2016. (a) Danneggiamento del parapetto dell'iconostasi, prossimo al collasso. (b) Danneggiamento del rosone di sinistra con alcuni conci sconnessi.





(a)



(b)

Figura 26. (a) Consolidamento estradossale della volta a crociera. (b) Schema della copertura della chiesa di San Salvatore.

Le scosse del 26 ottobre 2016, prima quella delle 19.10 (M 5.4) e poi quella delle 21.18 (M 5.9), entrambe con epicentro ben più vicino di quello del 24 agosto 2016, hanno causato il crollo della facciata della chiesa, delle volte e della copertura di un'ampia porzione dell'aula (Figura 27a).

L'ulteriore scossa del 30 ottobre 2016 ha infierito su quanto era rimasto, causando il crollo del campanile e dei campi di volta e della porzione di copertura che avevano resistito agli eventi precedenti (Figura 28).



(a)



(b)

Figura 27. Stato di danno della chiesa di San Salvatore dopo le scosse del 26 ottobre 2016. (a) Vista frontale della chiesa, immagine tratta da [16]. (b) Lesioni presenti sul muro laterale di destra (immagine tratta da un video dell'Ing. R. Vetturini). Da notare come la spinta in avanti legata alla massa delle volte a crociera si è scaricata a terra dando origine a dei puntoni diagonali sulla muratura perimetrale. Non ci sono puntoni diretti in modo inverso perché la presenza (sul retro della chiesa) del campanile, molto tozzo, ha impedito il movimento all'indietro delle volte.



(a)

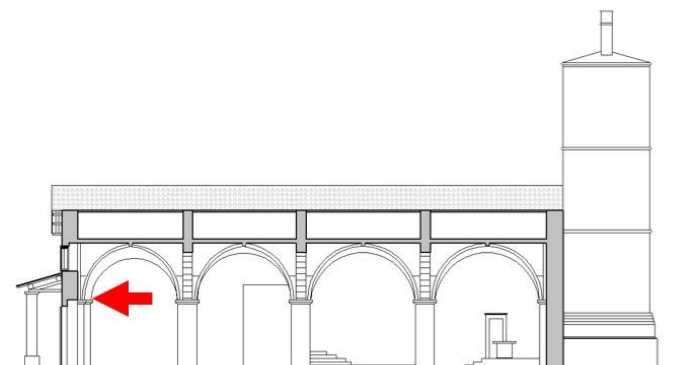


(b)

Figura 28. La chiesa di San Salvatore dopo il sisma del 30 ottobre 2016 (Immagini tratte da un video dell'Ing. R. Vetturini).

Per prevedere quanto è accaduto con le scosse del 26 ottobre 2016 bastava osservare le condizioni della porzione di facciata (Figura 29a) compresa tra le aperture (portali e rosoni) che non beneficia della presenza degli speroni posti alle estremità, ed effettuare una semplice verifica al ribaltamento.

Oltre ai pesi propri della parete di facciata e al carico derivante dalla copertura, vanno considerate le spinte orizzontali provenienti dal peduccio della volta a crociera adiacente alla facciata (Figura 29b). I carichi verticali della volta non vanno considerati nella verifica, poiché scaricano sul pilastro adiacente alla facciata, che, come già detto, era disconnesso da essa. Ad ostacolare il ribaltamento della parete possono essere considerate le travi di copertura, anche se il grado di vincolo che potevano fornire era piuttosto aleatorio. Il pilastro del portico antistante non risultava invece in grado di fornire alcuna opposizione al movimento della facciata.



(a)

(b)

Figura 29. (a). Porzione della facciata della chiesa di San Salvatore. (b) Sezione longitudinale della chiesa di San Salvatore con indicata la spinta proveniente dal peduccio della volta a crociera, che si scarica sulla facciata.

Anche per la chiesa di San Salvatore è stato messo a punto un modello tramite il software PCM Aedes e sono state condotte l'analisi pushover e l'analisi limite con il metodo dei cinematici di collasso.

L'analisi pushover per la chiesa di San Salvatore è giustificata dal fatto che si tratta di una costruzione piuttosto bassa, il cui comportamento potrebbe essere paragonabile a quello di un edificio ad un solo piano.

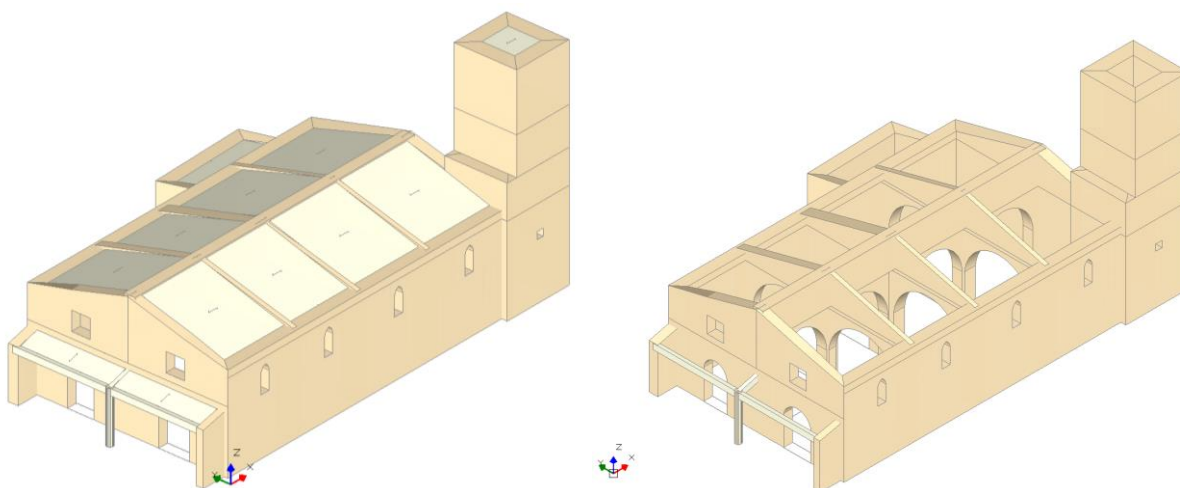


Figura 30. Modello numerico della chiesa di San Salvatore a Campi.

Il punto di controllo per gli spostamenti in analisi pushover è stato considerato sulla copertura della chiesa al livello 2 (quindi non sul campanile). Le distribuzioni dell'analisi pushover sono quelle non adattive e non multimodali previste dalle NTC 2008. Non sono stati considerati effetti torsionali globali poiché l'impalcato non è rigido.

I solai voltati sono definiti come rigidi per la presenza della soletta armata soprastante ma l'impalcato non è rigido in quanto l'impianto voltato è interrotto in maniera significativa nella navata di sinistra (mancano due campi di volte).



Il sito, per un edificio in classe d'uso III, ha una accelerazione  $a_g$  di 0.281g ed un suolo di categoria stratigrafica B e categoria topografica T1.

Per i materiali si è conseguito il livello di conoscenza LC1 con  $FC = 1.35$  e la muratura è in pietrame disordinato senza alcun coefficiente correttivo, i cui parametri meccanici sono stati tratti dalle tabelle della Circolare 617 del 2009.

Si perviene pertanto ad otto curve di pushover significative.

La curva con indice di rischio più basso è +X con distribuzione proporzionale alle forze statiche (la prima del gruppo 1 secondo le NTC) (Indice di rischio: 0.327) seguita immediatamente dalla curva in direzione -X con distribuzione uniforme di forze (gruppo 2-a secondo le NTC) che sembra corrispondere alla effettiva direzione di collasso dell'edificio. Per questa condizione si ha: Indice di rischio: 0.330 ; massima PGA sostenibile: 0.106 g.

Il tempo di ritorno del sisma allo SLV è  $T_{r\text{slv}} = 38$  anni che corrisponde ad una vita nominale restante (o ad un  $T_{INT}$ ) di 2.66 anni.

Da notare che già l'analisi pushover di questa chiesa evidenzia una situazione davvero critica con vita nominale restante di poco superiore a 2 anni.

- Asta in fase elastica
- Asta parzialmente plasticizzata
- Asta plasticizzata
- Asta collassata
- Asta in trazione/compressione eccessiva
- Asta non sottoposta a verifica

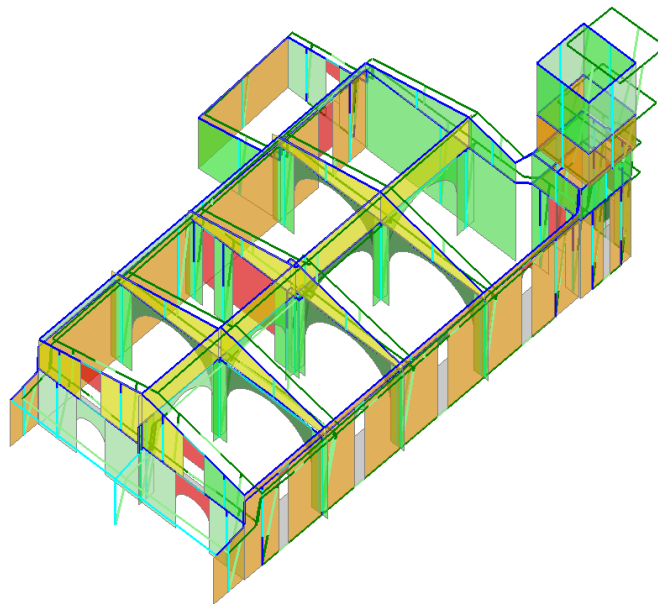


Figura 31. Combinazione +X con distribuzione proporzionale alle forze statiche (la peggiore). Verifiche a taglio.  $IR = 0.327$ .

- Asta in fase elastica
- Asta parzialmente plasticizzata
- Asta plasticizzata
- Asta collassata
- Asta in trazione/compressione eccessiva
- Asta non sottoposta a verifica

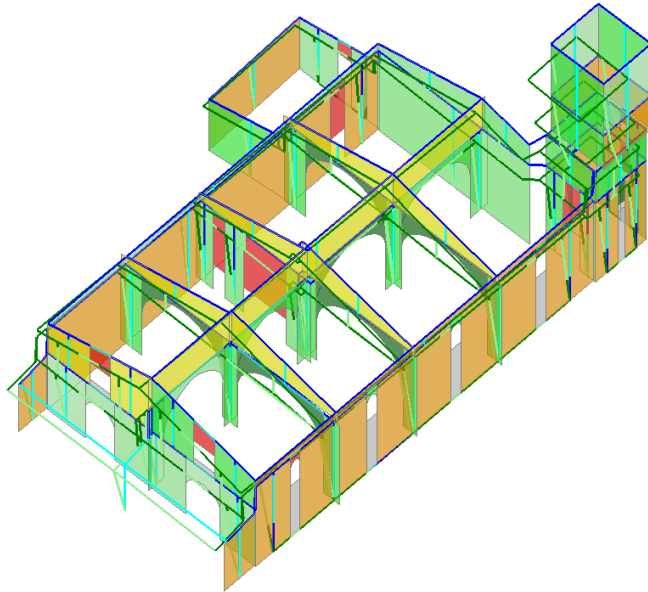


Figura 32. Combinazione  $-X$  con distribuzione proporzionale alle forze statiche. Verifiche a taglio.  $IR = 0.330$ .

- Asta in fase elastica
- Asta parzialmente plasticizzata
- Asta plasticizzata
- Asta collassata
- Asta in trazione/compressione eccessiva
- Asta non sottoposta a verifica

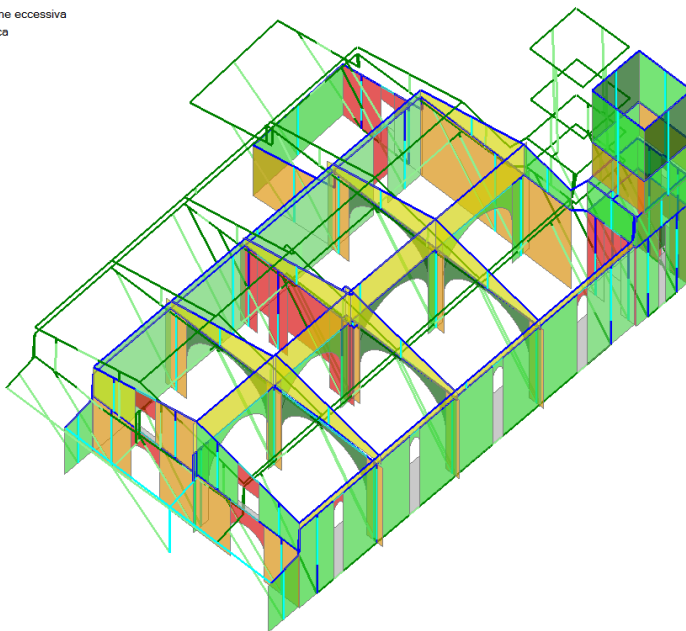


Figura 33. Combinazione  $+Y$  con distribuzione proporzionale alle forze statiche. Verifiche a taglio.  $IR = 0.673$ .

Il meccanismo di collasso analizzato per la chiesa di San Salvatore è quello che si è manifestato a causa del sisma, ossia il ribaltamento di parte della facciata sotto le spinte del sisma e delle volte ed archi retrostanti. Le ipotesi generali sono le stesse già descritte per il caso della chiesa di Santa Maria di Piazza.

Tale cinematismo è stato valutato sia per l'effettiva configurazione della chiesa sia nell'ipotesi che fossero stati effettuati semplici interventi di consolidamento.

Allo stato effettivo della chiesa il cinematismo manifesta un indice di rischio molto basso, pari a circa 0.247.

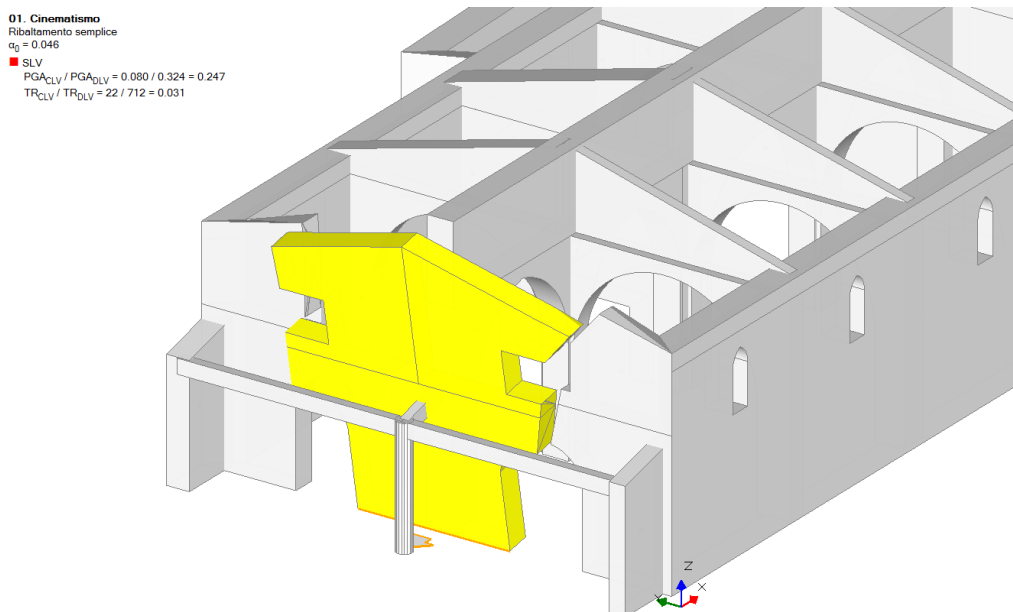


Figura 34. Meccanismo di facciata. La parete ribalta per un moltiplicatore dei carichi di 0.046 e quindi una PGA di 0.080g e manifesta un indice di rischio di 0.247 circa. Tali valori di capacità sono molto inferiori alle accelerazioni del 26 ottobre 2016.

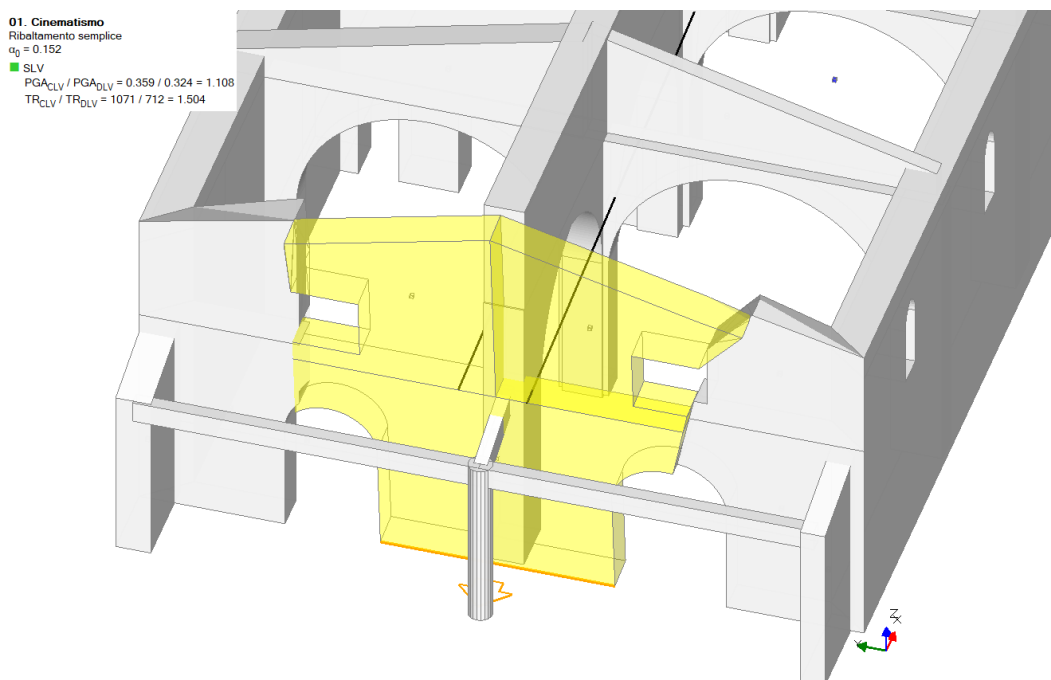


Figura 35. Meccanismo di facciata nell'ipotesi di intervento con catene in acciaio al livello delle volte. La parete ribalta per un moltiplicatore dei carichi di 0.152 e quindi una PGA di 0.359g e manifesta un indice di rischio di 1.1 circa, superiore all'adeguamento in base alle vigenti NTC 2008. Tali valori, pur portando all'adeguamento, sono ancora inferiori a quelli richiesti dai sismi del 26 ottobre 2016 (di cui sono disponibili dati registrati da una stazione accelerometrica a poche centinaia di metri dalla chiesa).

01. Cinematismo  
 Ribaltamento semplice  
 $\alpha_0 = 0.477$   
 ■ SLV  
 $PGA_{CLV} / PGA_{DLV} = 0.442 / 0.324 = 1.364$   
 $TR_{CLV} / TR_{DLV} = 2475 / 712 = 3.476$

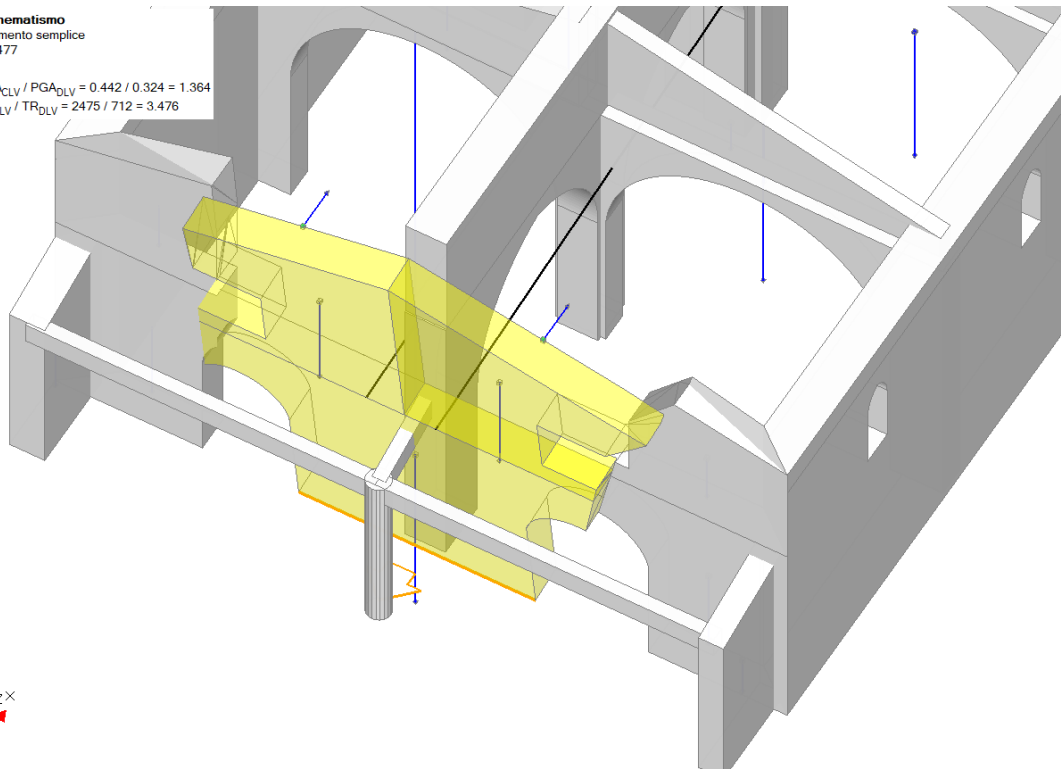


Figura 36. Meccanismo di facciata nell'ipotesi di intervento con catene in acciaio al livello delle volte e realizzazione di connessioni in copertura in grado di esercitare un tiro di 25 kN/ml. La parete ribalta per un moltiplicatore dei carichi di 0.477. La PGA sostenibile dal meccanismo e l'indice di rischio sono in realtà più elevati di quelli indicati dal software (che possiede un limite superiore per tali indici corrispondente ad un periodo di ritorno del sisma di 2475 anni). Con questi interventi la capacità raggiunge valori compatibili con quelli richiesti dai sismi registrati il giorno 26 ottobre 2016. Va evidenziato che tale affermazione naturalmente riguarda solamente il cinematismo qui esaminato.

Per il caso della chiesa di San Salvatore è possibile ripetere le considerazioni svolte per la chiesa di Santa Maria di Piazza: si evidenzia l'importanza decisiva dell'analisi dei meccanismi di collasso e si può notare che anche strumenti semplici, come l'analisi dell'equilibrio alla Giuffrè, o semplicissimi, come l'analisi della snellezza muraria alla Rondelet, avrebbero potuto mettere in luce, anche negli anni passati, l'estrema vulnerabilità di questa bellissima chiesa.

Il moltiplicatore dei carichi orizzontali tale da causare la perdita di equilibrio del cinematismo di facciata, valutabile con semplici considerazioni di equilibrio è  $\alpha_0 = 0.046$ , di gran lunga inferiore allo 0.28 richiesto dalla verifica alla Giuffrè.

La snellezza della facciata della chiesa era 11.2, maggiore del valore, 8, indicato da Rondelet come relativo a muri stabili, con in più, anche in questo caso, l'aggravante di una spinta molto consistente dell'arcata interna.

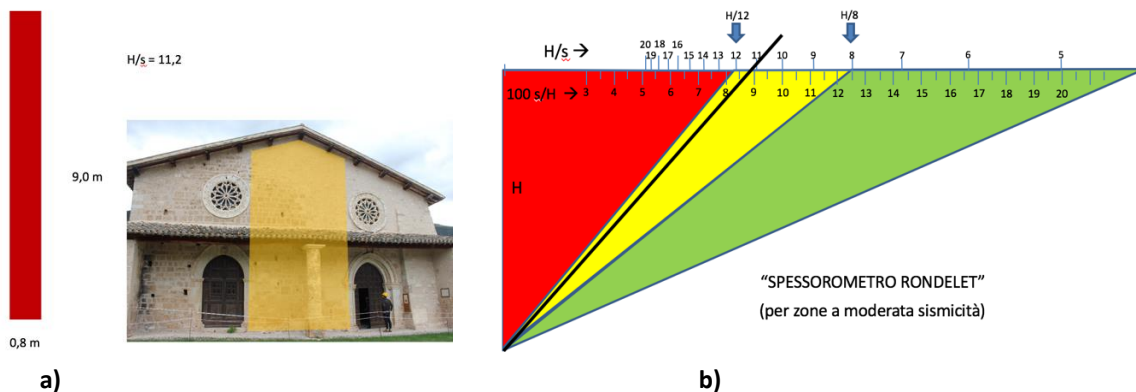


Figura 37. a) Snellezza della parete di facciata della chiesa di San Salvatore. b) "Spessorometro" di Rondelet applicato alla parete in questione.



L'esame di questo caso pone, tra l'altro, anche degli interrogativi relativamente al modo di considerare l'input sismico attualmente proposto nella normativa. Infatti, per questa chiesa è possibile conoscere l'effettivo valore delle caratteristiche del sisma che ne ha causato il crollo, cioè quello del 26 ottobre 2016 alle ore 19.10, registrato dalla stazione accelerometrica CMI posta a 200 metri dalla chiesa di San Salvatore (Figura 38).

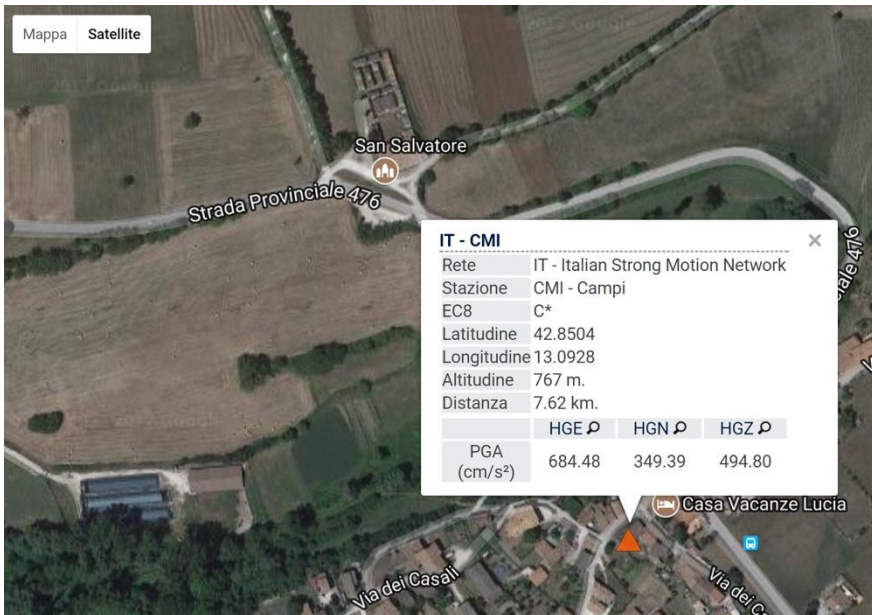


Figura 38. Posizione della stazione accelerometrica CMI della Rete Accelerometrica Nazionale RAN (<http://ran.protezionecivile.it/IT/index.php>).

L'analisi di tali dati (svolta dal Prof. Andrea Cannata del Dipartimento di Fisica e Geologia dell'Università di Perugia) e riportata nelle figure 39 e 40) evidenzia una direzione preferenziale del moto del terreno esattamente ortogonale alla facciata crollata (Est-Ovest).

L'analisi degli spettri di risposta calcolati a partire dai dati della stazione CMI per il sisma in esame mostra per la componente Est-Ovest valori di accelerazione registrati molto superiori a quelli proposti dalla Normativa anche per edifici nuovi in quel sito (Figura 41).

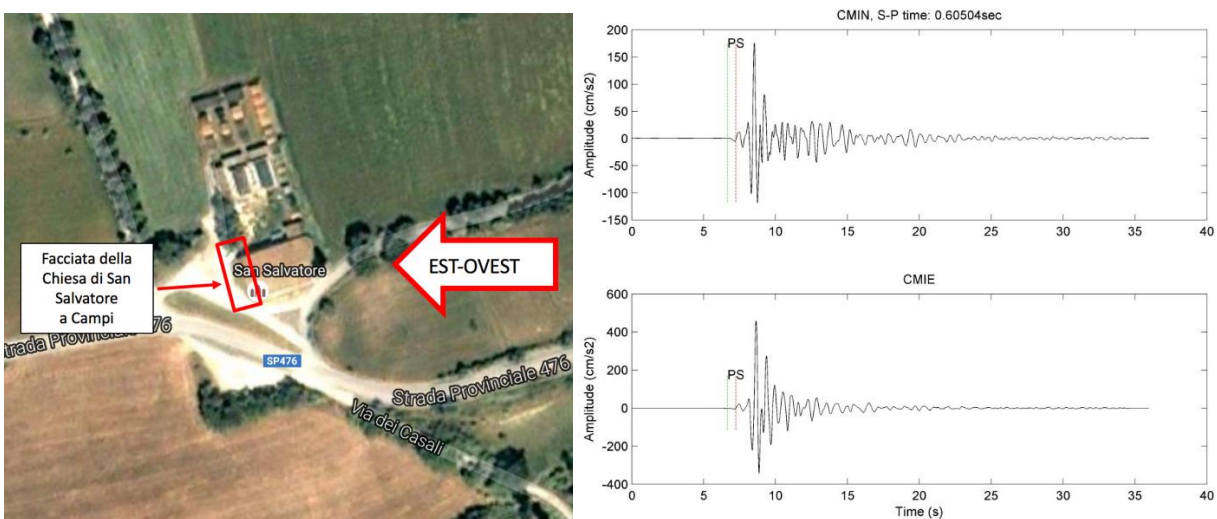


Figura 39. Accelerogrammi registrati dalla stazione accelerometrica CMI per il sisma del 26 ottobre 2016 ore 19.10, dai quali si nota come sia molto più rilevante la componente Est-Ovest (quella in basso in figura) che va ad investire in direzione perpendicolare la facciata della chiesa di San Salvatore.

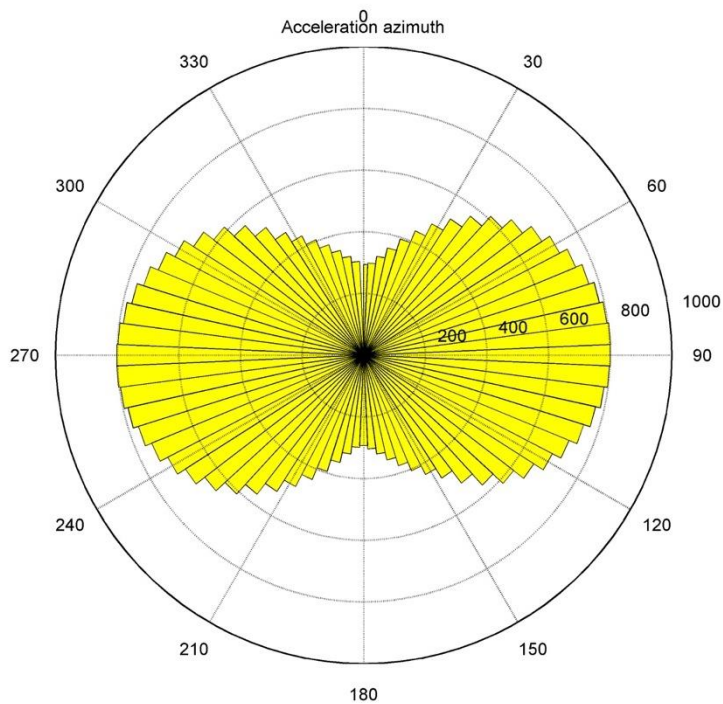


Figura 40. Diagramma a rosa che mostra la variazione dell'ampiezza massima radiale al variare dell'angolo di azimuth alla stazione CMI per il sisma delle 19.10 del 26 ottobre 2016. La direzione Est-Ovest è chiaramente quella di massima accelerazione.

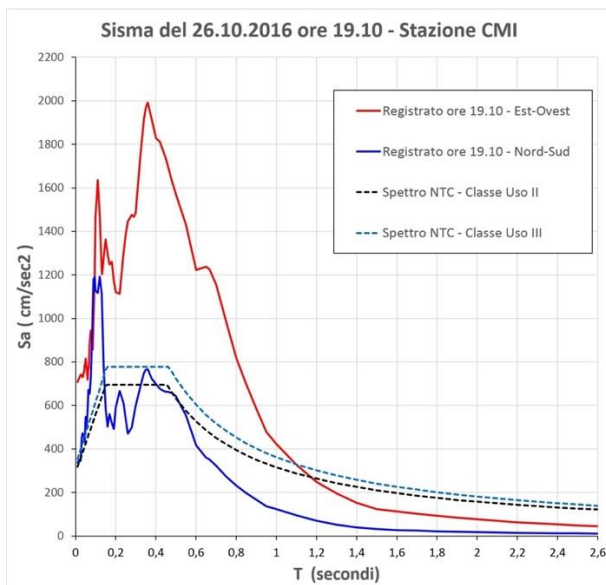


Figura 41. Spettri di risposta per il sisma del 26 ottobre 2016 ore 19.10 alla stazione CMI (Campi di Norcia). Sono ben evidenti valori di accelerazione nettamente superiori a quelli previsti dalle vigenti NTC 2008 per quel sito per edifici nuovi in classe d'uso II e III.

## CONCLUSIONI

Le analisi necessarie per valutare le vulnerabilità delle costruzioni storiche e comprenderne le eventuali necessità di intervento richiedono competenze di tipo strutturale, non sempre presenti tra i funzionari delle Soprintendenze, e coinvolgono sensibilità e problematiche diverse [17].

I crolli esaminati nel presente lavoro sono connessi proprio a queste carenze, e dall'atteggiamento conseguente, che ha portato, qui come in moltissimi altri casi, alla applicazione della regola frequente del "non intervento", con i risultati che qui abbiamo visto.

Non si può certo pensare che tali noncuranze derivino da una scelta deliberata e consapevole, da parte delle Soprintendenze, di lasciare campo libero ai disastri. Si deve quindi presumere che ad indurre a questa assenza di una seppur minima strategia preventiva sia la non conoscenza (e quindi la non comprensione) delle problematiche sismiche e delle loro implicazioni strutturali.

I crolli delle bellissime chiese di Campi di Norcia ne costituiscono una testimonianza dolorosa. Tutti e tre questi edifici di culto avevano buone probabilità di essere salvati (o di avere danni limitati) con semplici interventi preventivi; bastava avere chiare le priorità, ad esempio: prima i tiranti e poi la fissatura degli affreschi.

La chiesa di S. Andrea ne è l'esempio più evidente: ci sono voluti quattro terremoti in successione (24 agosto 2016, i due del 26 ottobre 2016 e quello del 30 ottobre 2016) per vincere la resistenza di quella sparuta catena lignea pluricentenaria. Evidentemente sarebbe bastato poco di più (una catena moderna, messa dove più serviva) e ce l'avrebbe fatta.

A San Salvatore purtroppo di catene non c'era proprio alcuna traccia, e tale mancanza ha aperto la strada ad un rovinoso crollo, giunto con il primo evento di intensità rilevante per quella zona.

Il caso della chiesa di S. Maria di Piazza, infine, rappresenta l'apice – una vetta forse insuperabile - della mancanza di considerazione nei confronti dei problemi strutturali, pur a fronte di precise indicazioni di vulnerabilità.

Le carenze di questo edificio erano state chiaramente denunciate con ricerche ed analisi condotte da persone qualificate e competenti, appartenenti sia a prestigiose Università che al MiBACT stesso, ma, pur davanti ad una situazione di così conclamata e nota gravità, nulla è stato fatto. Così anche questa chiesa, con tutti i suoi affreschi, è stata ridotta ad un cumulo di macerie.

Questi crolli rovinosi li ritroveremo, purtroppo, anche negli anni a venire in altre zone d'Italia, laddove ci sono state analoghe noncuranze verso le esigenze strutturali di questa tipologia di costruzioni storiche.

C'è solo una cosa che non sappiamo: a chi toccherà la prossima volta?

## **RINGRAZIAMENTI**

Le chiese esaminate in questo articolo fanno parte di un numeroso gruppo di beni culturali (in massima parte, edifici di culto) oggetto di sopralluoghi compiuti in Valnerina tra il 13 settembre 2016 ed il 26 ottobre 2016, congiuntamente dai tecnici dell'Unità di Ricerca ReLUIS di Perugia (responsabile scientifico: Antonio Borri) e funzionari del MiBACT e della Soprintendenza Archeologica, Belle Arti e Paesaggio dell'Umbria. A tutti loro va il ringraziamento ed il riconoscimento dell'eccezionale lavoro svolto, con la speranza che quanto hanno fatto possa essere utile in futuro.

Lo studio di cui alla presente nota è stato svolto nell'ambito del Progetto Esecutivo ReLUIS 2017 – Linea murature e della convenzione ReLUIS SISMA 2016.

Si ringraziano il Prof. Andrea Cannata del Dipartimento di Fisica e Geologia dell'Università degli Studi di Perugia e il Prof. Massimiliano Barchi, Direttore dello stesso Dipartimento, per le elaborazioni dei dati accelerometrici e per gli utili consigli.

Si ringrazia infine Cristina Eleuteri per il lavoro che ha svolto su questi casi nell'ambito del suo lavoro di tesi.

La prima parte del presente testo è una rielaborazione di un articolo pubblicato su Structural – n. 210, marzo/aprile 2017, ISSN 2282-3794 - DOI 10.12917/Stru210.08 [19].

## **BIBLIOGRAFIA**

1. B. Toscano, L. Giacchè, B. Ragni, (1977), "L'Umbria. Manuali per il territorio. La Valnerina. Il Nursino. Il Casciano", Roma, Edindustria.
2. [http://emidius.mi.ingv.it/GNDT2/Att\\_scient/PE2002\\_Brief\\_Reports/brief\\_reports\\_con\\_int.htm](http://emidius.mi.ingv.it/GNDT2/Att_scient/PE2002_Brief_Reports/brief_reports_con_int.htm)
3. F. Bonfanti, F. Pisco, Tesi di laurea "Campi Alto di Norcia: metodologia per un'indagine conoscitiva del centro storico e per la valutazione delle tecniche di intervento con individuazione delle principali cause di vulnerabilità ai fini della prevenzione". Relatore Prof.ssa L. Binda, Fac. di Architettura, Politecnico di Milano, a.a. 2001-2002.

4. L. Marchetti, Vulnerabilità dei Centri Storici e dei Beni Culturali, Gruppo nazionale per la difesa dei terremoti, Relazione annuale ([ftp://ftp.ingv.it/pro/gndt/Att\\_scient/Pe2001\\_RelAnn/Marchetti/PE2001\\_RelAnn\\_Marchetti\\_ita.pdf](ftp://ftp.ingv.it/pro/gndt/Att_scient/Pe2001_RelAnn/Marchetti/PE2001_RelAnn_Marchetti_ita.pdf))
5. G. Cardani; Tesi di dottorato di ricerca in conservazione dei Beni Architettonici, “La vulnerabilità sismica dei centri storici: il caso di Campi Alto di Norcia. Linee guida per la diagnosi finalizzata alla scelta delle tecniche di intervento per la prevenzione dei danni”. Relatori: Prof.ssa L. Binda, Prof. S. Della Torre e Arch. A. Saisi, Politecnico di Milano, 2003. [http://opac.biblio.polimi.it/sebina/repository/link/oggetti\\_digitali/fullfiles/PERL-TDDE/TESI\\_2004-039.PDF](http://opac.biblio.polimi.it/sebina/repository/link/oggetti_digitali/fullfiles/PERL-TDDE/TESI_2004-039.PDF).
6. L. Binda, G. Cardani, C. Modena, M.R. Valluzzi, L. Marchetti, “Indagine sulla consistenza dell’edilizia storica, sul danno pregresso e sull’efficacia degli interventi svolta su quattro centri campione in Umbria”. XI congresso Nazionale “Ingegneria Sismica in Italia”, Genova, 25-29 gennaio 2004.
7. <http://www.iluoghidelsilenzio.it>
8. <http://www.norcia.net>
9. <http://www.lavalnerina.it>
10. <http://www.osservatorioricostruzione.regione.umbria.it>
11. <http://www.antenucciugosrl.it/identificalm.aspx?idArt=185>
12. <http://www.spoletonorcia.it/beni-culturali/i-luoghi-della-croce/471-campi-di-norcia-chiesa-di-san-salvatore.html>
13. <http://www.lavoce.it/sisma-centro-italia-crolli-e-sfollati-nella-zona-di-norcia-i-video-e-le-immagini/#ad->
14. C. Ferrari, “Chiesa di San Salvatore a Campi di Norcia. Prime analisi del crollo definitivo della facciata a seguito del sisma del 27.10.2016”, Ingegno, Novembre 2016.
15. F. Ventura, comunicazione personale.
16. <http://www.umbria24.it/fotogallery/sisma-il-crollo-della-chiesa-di-san-salvatore-il-campanile-a-un-da-terra>
17. A. Borri, “Strutturisti e Restauratori: Sicurezza Vs Conservazione? Problemi, dubbi e proposte”, Structural 199, Ottobre 2015, 10.12917/Stru199.24 – <http://www.dx.medra.org/10.12917/Stru199.24>
18. J.B. Rondelet, “Trattato teorico e pratico dell’arte di edificare”, Ed. Caranenti, Mantova, 1831
19. A. Borri, R. Sisti, “Crolli di chiese causati dai sismi in Italia: prime considerazioni su alcuni recenti casi in Valnerina”, <https://doi.org/10.12917/STRU210.08>
20. L. Rambotti, comunicazione personale.