

Valutazione della vulnerabilità sismica della Chiesa di Santa Maria della Misericordia di Coreggio (RE)

Corrado Prandi¹, Ada Zirpoli², Paolo Sattamino³ ■



Progetto / Nome dell'opera

Chiesa di Santa Maria della Misericordia

Ubicazione

Correggio (RE)

Committente

Parrocchia dei SS. Quirino e Michele di Correggio

Gruppo di progetto

Arch. Mauro Severi (capogruppo)

Arch. Franco Bellelli,
Arch. Daniela Caffagni,
Ing. Andrea Guaitolini,
Arch. Gianluca Nicolini,
Ing. Corrado Prandi,
Arch. Cristina Severi.

Progettista e DD.LL.

Ing. Corrado Prandi

Sviluppo modello f.e.m. ed analisi

Ing. Corrado Prandi, Ing. Ada Zirpoli, Ing. Paolo Sattamino.

Impresa appaltatrice

Medici edilizia s.s.
Geom. Marcello Medici.

Anno

completamento lavori
2011

Il presente lavoro riguarda la valutazione della vulnerabilità sismica di un edificio monumentale in muratura di notevole interesse e pregio quale la Chiesa di Santa Maria della Misericordia, inserita nel tessuto urbano del centro storico di Correggio (RE), oggi chiusa al culto ed ospitante, un tempo, i dipinti di Antonio Allegri detto il Correggio. Nonostante la costruzione della Chiesa e dei locali contigui risalgano al 1300 circa, la struttura si configura nel suo aspetto attuale solo nel 1700, infatti nel corso dei secoli il fabbricato è stato interessato da numerosi interventi di modifica e di riparazione, da aggiunte di elementi e da variazioni degli accessi. Negli ultimi anni è stato appositamente istituito un Comitato di Professionisti per la messa in sicurezza della costruzione, particolarmente danneggiata dagli eventi sismici del 1996 e del 2000, e del quale lo scrivente è un componente incaricato degli aspetti legati all'analisi strutturale ed alla Direzione Lavori. L'autore, nell'affrontare il lavoro descritto in questo contributo, e particolarmente per quanto riguarda la fase di estensione e completamento del modello ad elementi finiti, si è avvalso della fondamentale collaborazione dei due co-autori, Ing. Zirpoli e Ing. Sattamino. Ampie e maggiormente dettagliate notizie storiche, ulteriori immagini ed elaborati grafici e tecnici, rispetto al materiale presentato in questo contributo, sono visionabili da www.studioprandi.com/external. La disponibilità di accurati rilievi geometrici sia dei materia-

li sia del quadro fessurativo, contenuti nelle tesi di laurea di motivati colleghi, unitamente alle estese informazioni storiche, ha consentito l'esecuzione di analisi strutturali fondate su dati attendibili. Sono stati utilizzati due differenti software per il supporto al disegno ed ai calcoli, opportunamente linkati fra loro, in modo tale da permettere l'importazione nel software di calcolo del modello realizzato in ambiente cad, consentendo quindi un notevole risparmio di tempo ed una modellazione fortemente rappresentativa della struttura reale. Grazie poi ad un nuovo modulo di automesh e progetto, è stato possibile completare il modello di calcolo effettuando un'efficace discretizzazione automatica ad elementi finiti. L'intera struttura è stata inizialmente sottoposta ad un'analisi sismica globale in campo elastico, previa modellazione a telaio equivalente, al fine di individuare le zone maggiormente danneggiate. La disponibilità di accurati rilievi geometrici, dei materiali e del quadro fessurativo, unitamente alle estese informazioni storiche, ha consentito il confronto con i risultati delle analisi. Tale confronto ha portato il progettista a concentrare l'attenzione sulla zona del campanile e di alcune murature contigue. Su questa zona si è effettuata un'analisi sismica in campo elastico dopo aver operato una modellazione ad elementi finiti al continuo, con utilizzo di elementi bidimensionali, abbandonando quindi la schematizzazione a telaio equivalente. Tale analisi ha permesso l'estra-

¹ Studio Prandi, C.so Cavour 20, Correggio (RE) - ✉ ingprandi@gmail.com

² Harpaceas s.r.l., V.le Richard 1, Milano - ✉ zirpoli@harpaceas.it

³ Harpaceas s.r.l., V.le Richard 1, Milano - ✉ sattamino@harpaceas.it

polazione delle forze d'inerzia relative ai modi principali, successivamente utilizzate per simulare la procedura di pushover con distribuzione di carico proporzionale ai modi.

L'analisi di pushover è stata effettuata dopo aver integrato i dati del materiale elastico lineare con i parametri del modello costitutivo Strumas, formulato da Pande et al. nel 1996 ed implementato nel software di calcolo. Si tratta di un legame elastico non lineare specificatamente formulato per cogliere le caratteristiche della struttura disomogenea delle murature, grazie ad avanzate tecniche di omogeneizzazione. Per mezzo dei numerosi automatismi presenti nel software di calcolo, è stato possibile ricostruire la procedura di pushover così come dettato dalla normativa, adattandola ad una modellazione al continuo. Sono stati ricreati i casi di carico proporzionali ai modi ed alle masse ed è stata costruita una curva taglio alla base-spostamento del punto di controllo sulla quale sono state infine applicate le procedure di post-processing per l'individuazione del rapporto domanda/capacità di spostamento. La campagna di studi effettuata ha sensibilizzato il committente nei confronti di eventuali interventi di ristrutturazione che, da quanto emerso nelle analisi, potranno in prima battuta interessare la zona del campanile.

Ulteriori dettagli riguardanti la modellazione e le analisi sono elencati di seguito:

1) Semplificazioni riguardanti la modellazione a telaio equivalente

- limitazione nella disposizione delle murature secondo 3 direzioni, due delle quali tra loro ortogonali;
- modellazione degli archi con un elemento trave avente altezza pari alla metà della freccia dell'arco;
- inserimento nel doppio volume della navata della chiesa di un impalcato fittizio intermedio con trasferimento minimo di carico alle pareti;
- vincolo dei setti in fondazione secondo lo schema di trave su suolo elastico;
- assunzione dell'ipotesi di impalcato a comportamento rigido per tutti i livelli previsti nel modello;
- assunzione di uniformi caratteristiche meccaniche della muratura, pari al minimo valore proposto dalla norma vigente.

2) Ipotesi assunte nella successiva modellazione con elementi bidimensionali:

- muratura antica con caratteristiche meccaniche modeste ($E=600 \text{ N/mm}^2$);
- muratura dei pilastri della cella campanaria ($E=400 \text{ N/mm}^2$);
- muratura meno antica e realizzata con leganti di qualità migliore (1200 N/mm^2);
- impalcato recente in acciaio e latero-cemento ($E=30000 \text{ N/mm}^2$);

- incastro a livello delle fondazioni e vincoli secondo allineamenti verticali per simulare il contenimento operato dalle murature delle costruzioni contigue;

- opzione di piano rigido agli impalcato a volta o di copertura (ipotesi ritenuta ragionevole grazie alla presenza di spessori elevati di laterizio, compatti massetti di pavimentazione e connessione tra gli elementi lignei).

3) Analisi elastica statica con soli carichi verticali sul modello con elementi bidimensionali

- soddisfacenti riscontri con lo stato tensionale determinato mediante calcoli manuali;

- le zone caratterizzate dagli sforzi principali massimi di trazione e compressione ($+0.3 \text{ N/mm}^2$ e -2.5 N/mm^2) corrispondono a quelle zone realmente più danneggiate nella realtà.

4) Analisi modale sul modello con elementi bidimensionali

- Il primo modo è in direzione trasversale alla navata e mobilita il 76% dell'intera massa; il secondo modo è longitudinale alla navata principale e mobilita il 32% della massa, concentrandosi nella zona del campanile.

- I modi di vibrare principali evidenziano chiaramente la predominanza degli spostamenti del campanile rispetto al resto della costruzione, in coerenza con il livello di danneggiamento riscontrabile al vero.

5) Analisi sismica dinamica sul modello con elementi bidimensionali

- E' stato utilizzato lo spettro di progetto per il comune di Correggio (RE) considerando un terreno di tipo C ed un fattore di struttura $q = 2.2$. In particolare, si è fatto riferimento all'accelerazione massima allo SLC ($\alpha = 0.33 \text{ ag/g}$), in quanto i dati sui sismi passati della zona forniscono accelerazioni molto vicine a questa.

- Spostamenti massimi di circa 3 cm sulla sommità del campanile. Nella realtà il campanile ha già un fuori piombo di 7 cm, frutto di gravi danneggiamenti avvenuti nel corso del tempo, compresa un'intera ricostruzione alla fine del 1800.

- Dall'analisi delle tensioni si evidenzia la diffusione delle zone in trazione (in rosso). Si noti nelle figure seguenti che i valori sono vicini a quelli limite per la malta effettivamente utilizzata. Questo è coerente con un danneggiamento diffuso e con l'assenza di un collasso vero e proprio della struttura.

6) Analisi statica non lineare su una porzione della struttura: il modello costitutivo Strumas

- Sono effettuate analisi pushover con differenti distribuzioni di carico per studiare più approfonditamente la zona del campanile, tenendo conto del comportamento non lineare delle murature.

- Il modello costitutivo Strumas, elastico perfettamente plastico, concentra la non linearità nei giunti orizzontali e verticali della mura-

tura, per i quali è possibile fornire resistenze differenti. Gli unici parametri richiesti sono le resistenze a trazione e compressione dei giunti e del mattone, nonché i parametri di deformabilità e la geometria del volume rappresentativo di muratura. Caratteristiche meccaniche della muratura (valori in N/mm^2): $f_{c_{\text{mattone}}} = 5$, $f_{c_{\text{malta}}} = 2.5$, $f_{t_{\text{mattone}}} = 0.75$, $f_{t_{\text{malta}}} = 0.3$.

- Nelle figure seguenti si riportano i punti di raggiungimento della resistenza a trazione della malta dei giunti. Si noti la concentrazione alla base del campanile, sui pilastri della volta

campanaria e sull'arco principale, zone nella realtà estremamente danneggiate.

- E' già stato presentato all'esame della soprintendenza di Bologna il progetto di consolidamento, che prevede l'inserimento di un pur leggero, ma necessario, traliccio all'interno del campanile. La decisione riguardo a questo semplice e poco costoso intervento è stata possibile grazie al dettaglio dei risultati delle analisi che, su tutti i livelli, hanno circoscritto al campanile la zona più critica. La variazione di comportamento in presenza del traliccio in acciaio sarà oggetto delle prossime analisi.



(1)

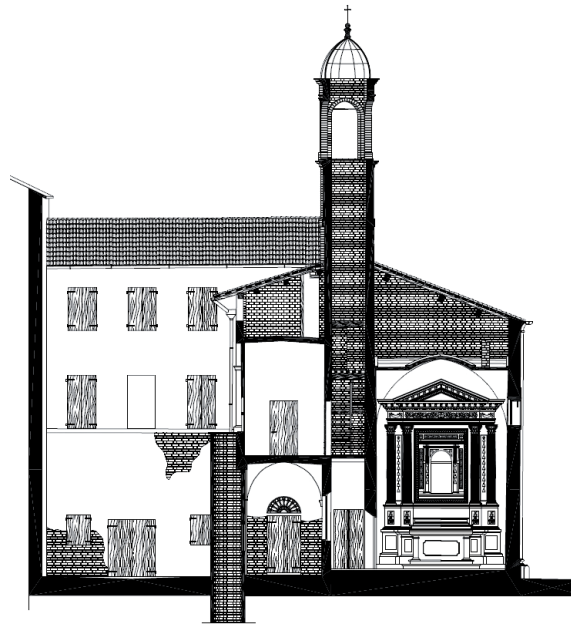
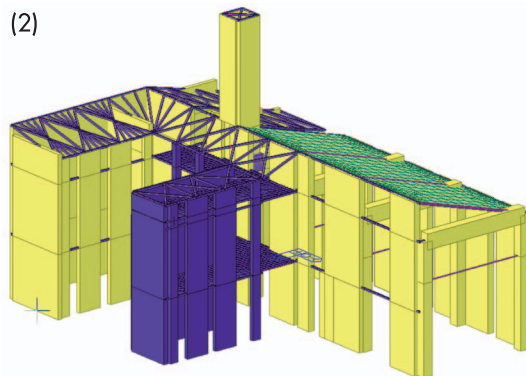
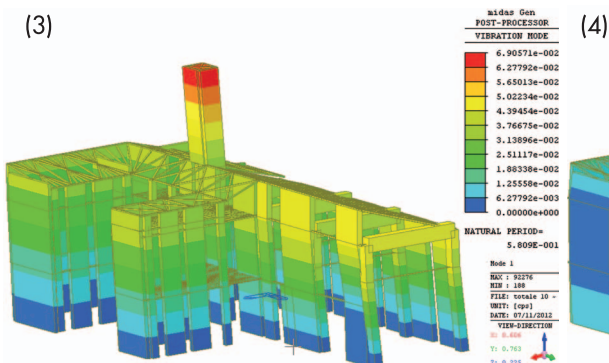


Figura 1
Vista d'angolo ed elaborato relativo al prospetto della struttura.

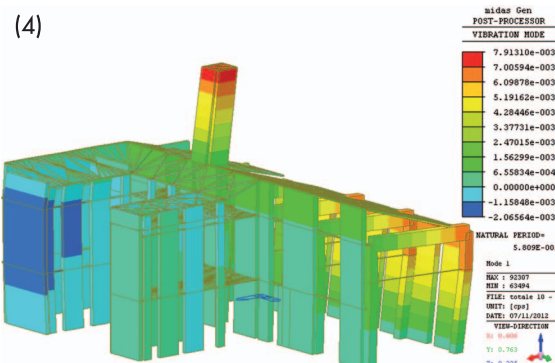


(2)

Figura 2
Modellazione a telaio equivalente.



(3)



(4)

Figura 3
Deformata relativa al Primo Modo del modello a telaio equivalente (direzione trasversale alla navata, 86% di massa partecipante).

Figura 4
Deformata relativa al Secondo Modo del modello a telaio equivalente (particolare concentrazione nella zona del campanile, 24% di massa partecipante).

Figura 5
Modellazione ad elementi finiti bidimensionali.

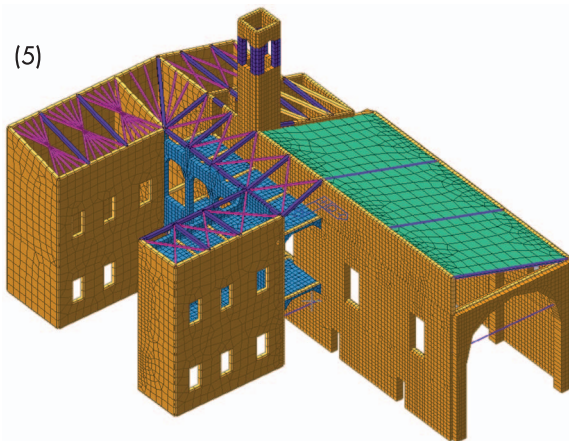


Figura 6
Modellazione impalcati rigidi.

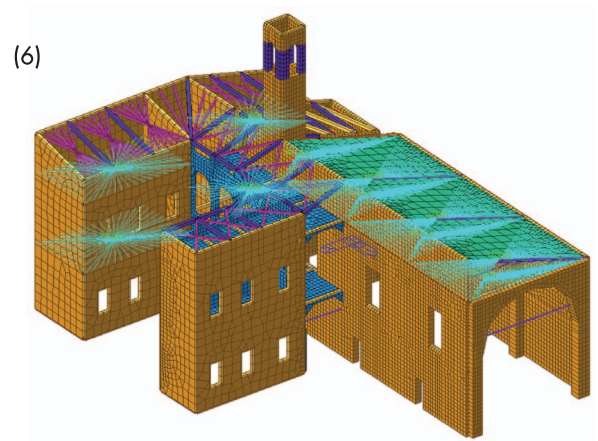


Figura 7
Sforzi principali di trazione.

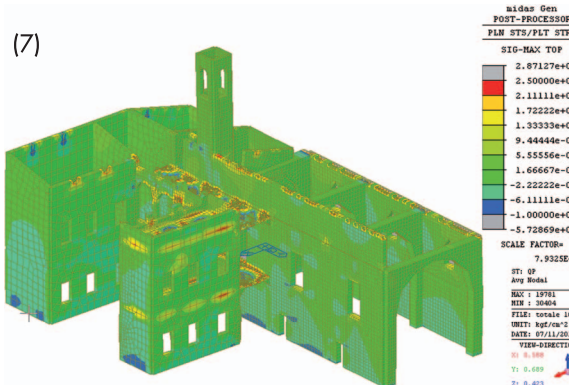


Figura 8
Sforzi principali di compressione.

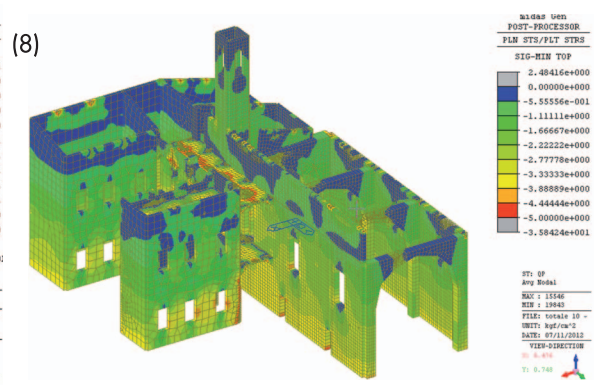


Figura 9
Deformata relativa al Modo 1 per la modellazione con elementi bidimensionali.

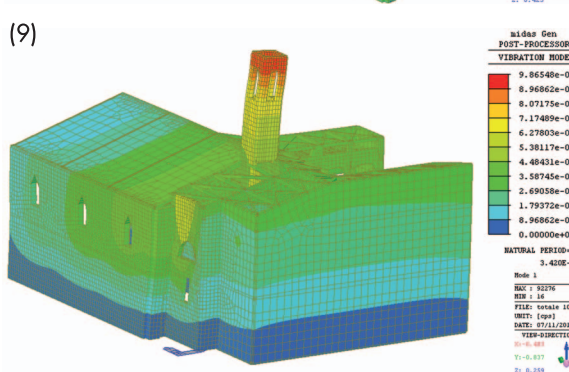


Figura 10
Deformata relativa al Modo 2 per la modellazione con elementi bidimensionali.

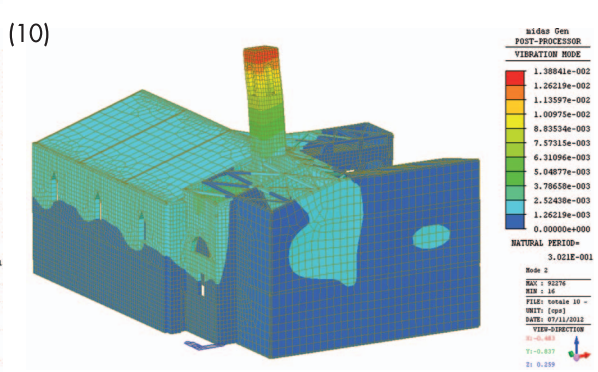


Figura 11
Spettro di progetto utilizzato per le analisi dinamiche.

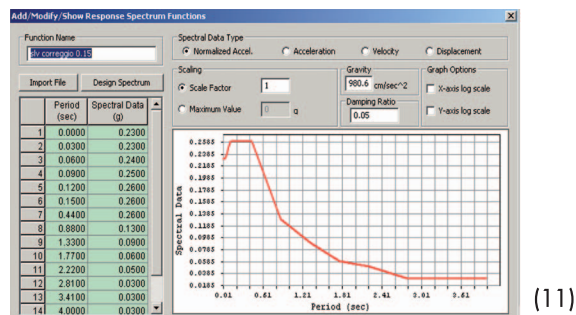


Figura 12
Deformata in direzione trasversale alla navata per effetto del sisma agente lungo tale direzione.

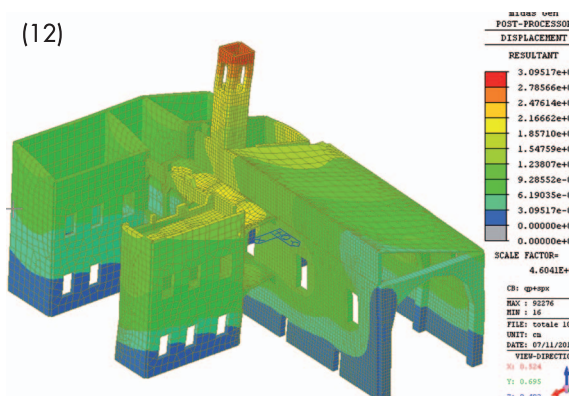
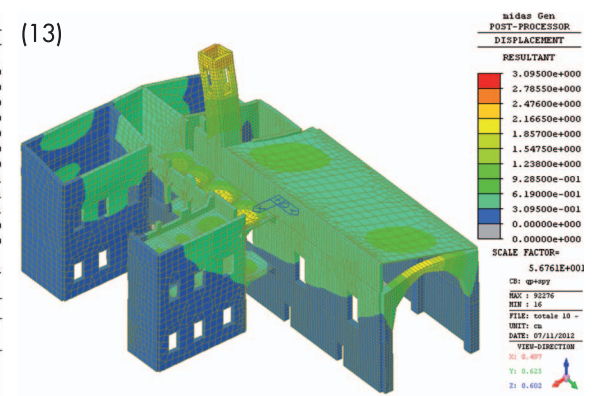
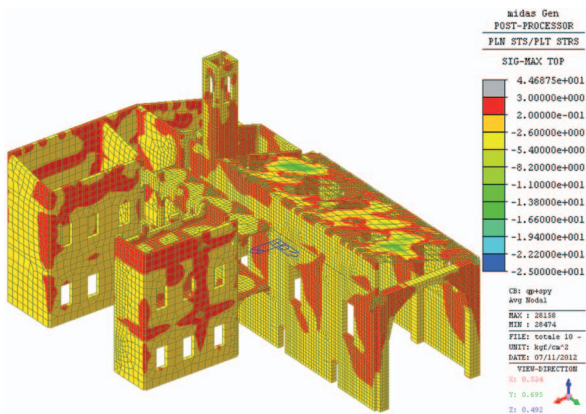


Figura 13
Deformata in direzione longitudinale alla navata per effetto del sisma agente lungo tale direzione.





(14)

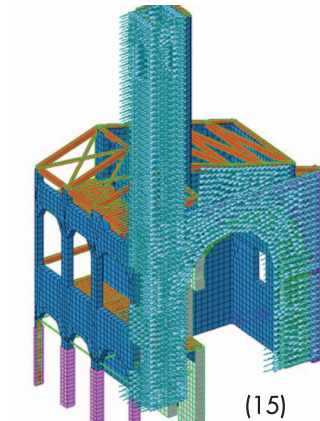


Figura 14
Sforzi principali di compressione.

Figura 15
Forze d'inerzia equivalenti alla porzione di struttura inclusa nel modello parziale.

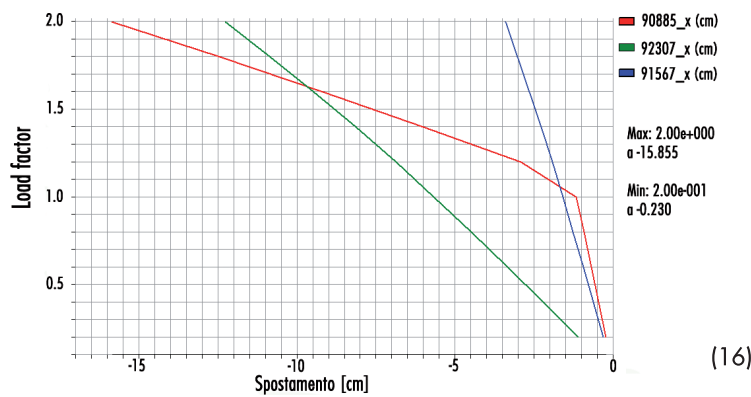


Figura 16
Curve di capacità per tre punti significativi.

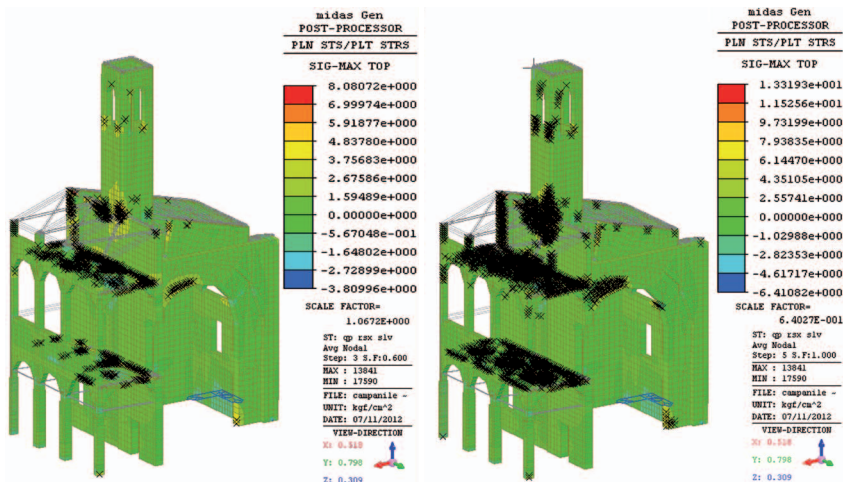


Figura 17
Punti di raggiungimento della resistenza a trazione della malta.



Figura 18
Un dettaglio in cui è particolarmente visibile il livello di danneggiamento del campanile (a sinistra) e una veduta del campanile circondato dalle impalcature.

Figura 19
Distacco della ghiera dell'arco dalla muratura della cella campanaria.

Figura 20
Parete nord della chiesa
interessata da fuori piombo.



(20)

Figura 21
Recente copertura incongrua
della navata.



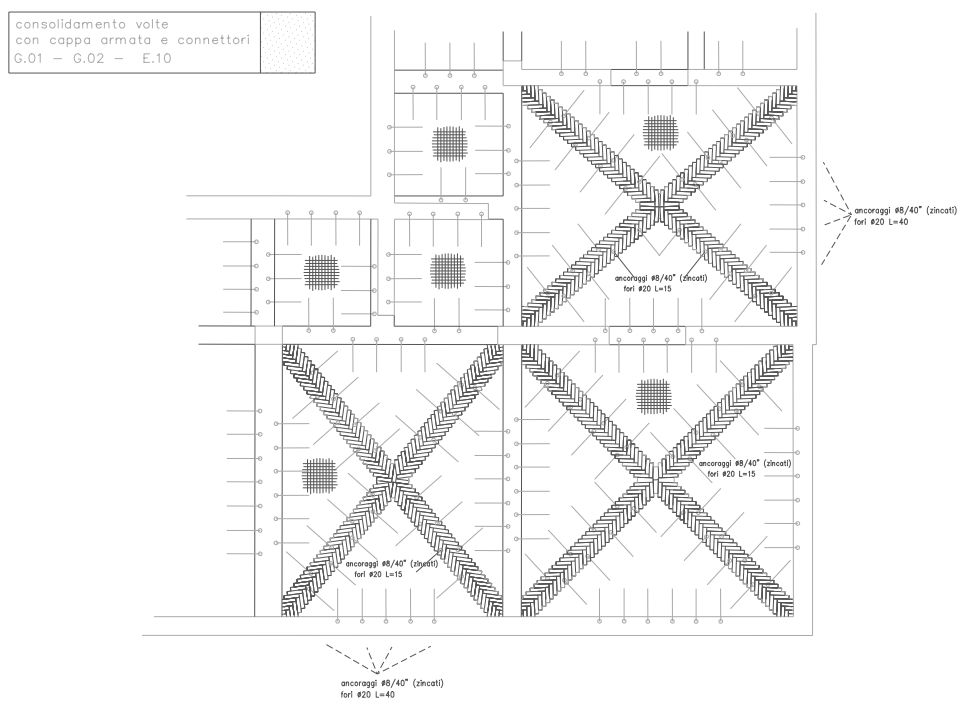
(21)

Figura 22
Puntellatura diffusa
delle volte.



(22)

Figura 23
Consolidamento volte con
cappa armata e connettori.



SEZ. TIPO

