



**Politecnico
di Torino**

Tesi Meritoria

Corso di Laurea Magistrale Architettura per il Patrimonio

Abstract

**Comportamento sismico dei sistemi voltati
Meccanismi ricorrenti in occasione del terremoto de L'Aquila del 2009**

Relatore

Prof. Cesare Tocci

Candidata

Francesca De Cola

Febbraio 2024

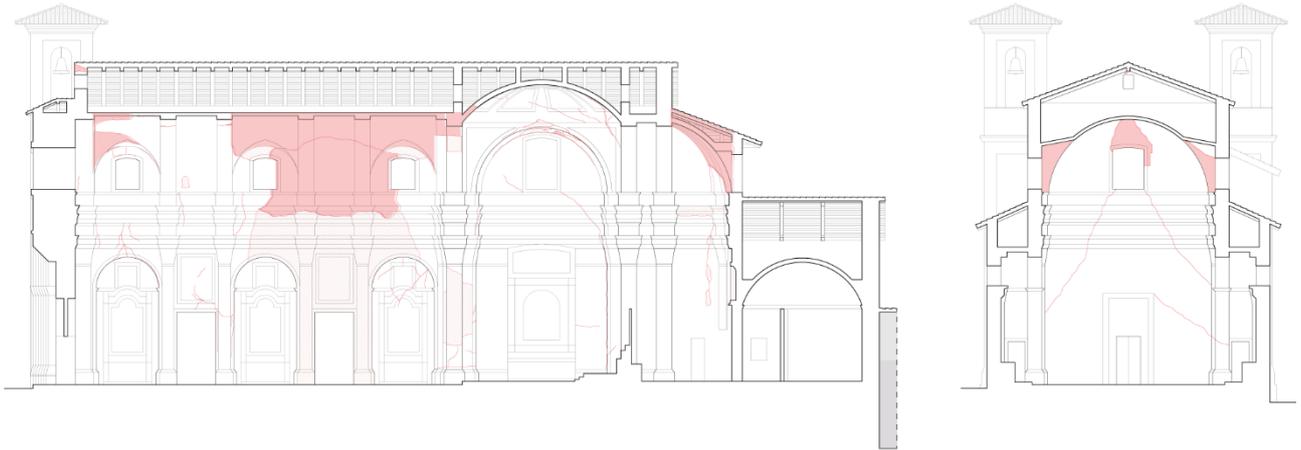
Il terremoto ha da sempre costituito una minaccia per il patrimonio architettonico storico, in particolar modo per il territorio italiano, caratterizzato da una elevata pericolosità sismica. La storia del costruire è, quindi, sempre stata, più o meno consapevolmente, condizionata dalla necessità di garantire la stabilità delle fabbriche anche in presenza delle azioni derivanti dal terremoto: soluzioni sempre più efficaci, riconoscibili come risposta intenzionale al problema sismico a partire dal XVIII secolo, sono state sviluppate nel corso dei secoli e hanno permesso la sopravvivenza degli edifici storici in contesti sismici anche molto ostili. L'intervento della meccanica moderna ha consentito di fondare su solide basi razionali questo processo, sistematizzandolo ed estendendolo dalla muratura ad altre tipologie costruttive.

La ricerca qui presentata ha per oggetto l'analisi del comportamento sismico dell'architettura muraria storica e, in particolare, di uno dei sistemi costruttivi che maggiormente la caratterizzano: le strutture voltate. La conoscenza dei meccanismi che governano le modalità di collasso dei sistemi voltati è di fondamentale importanza per identificarne le debolezze e le vulnerabilità e, conseguentemente, per la definizione di interventi di restauro volti a migliorarne le prestazioni sismiche senza snaturarne i caratteri tecnico-costruttivi. Tale conoscenza è tanto più necessaria quanto più i moderni materiali sembrano consentire aumenti di capacità portante dei sistemi voltati non correlati con le reali necessità strutturali.

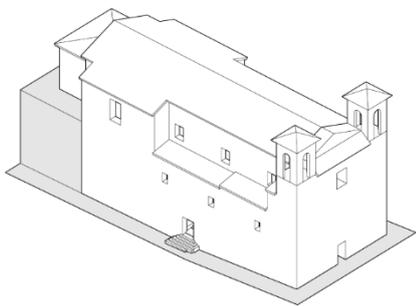
La ricerca è stata effettuata assumendo come caso studio il terremoto che ha sconvolto il territorio aquilano nell'aprile del 2009 e limitando l'analisi all'edilizia religiosa: la disponibilità di un gran numero di dati, acquisiti sia durante la fase di emergenza sia in occasione delle attività di ricostruzione, ha infatti permesso di svolgere un'approfondita lettura dei danni rilevati nelle chiese selezionate e di comprendere i probabili cinematismi dai quali hanno avuto origine. Il lavoro ha richiesto l'analisi dei caratteri storici e tecnico-costruttivi delle fabbriche e un più generale studio relativo alla sismicità locale storica e all'evoluzione dei presidi antisismici durante gli ultimi secoli.

Il riconoscimento e la categorizzazione dei cinematismi ricorrenti nelle volte delle chiese aquilane costituiscono risultati originali della ricerca e sono stati conseguiti avendo come riferimento per un verso l'apparato teorico derivante dalle prime ricerche settecentesche sulla statica degli archi e dal loro successivo inserimento nel quadro concettuale dell'analisi limite e, per altro verso, la realtà costruita dell'architettura, in un processo nel quale il modello teorico supporta la fase di interpretazione del dato fisico e, da questo, viene legittimato.

Chiesa di San Marco rilievo del danno

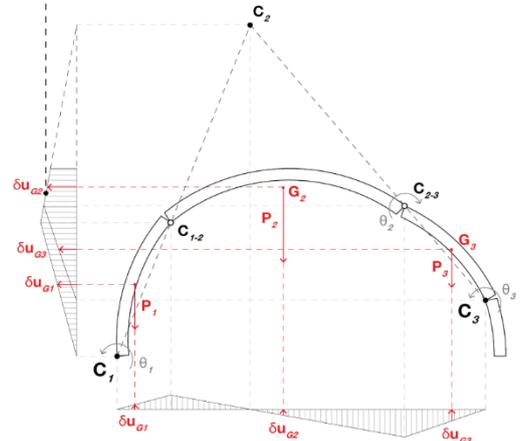


Chiesa di San Marco interpretazione del danno e cinematici

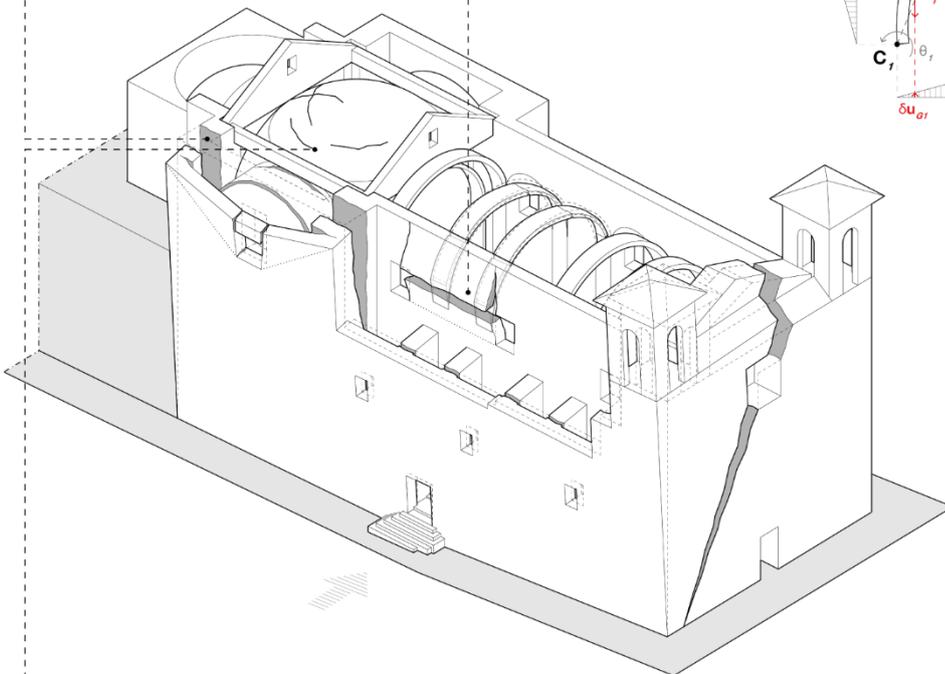


1 La **risposta trasversale dell'aula** è il meccanismo più severo; a questo è dovuto il crollo della parte superiore della parete del fianco sinistro. La localizzazione del crollo è dovuto sia al maggior impulso del sisma in direzione nord-sud che alla **maggiore snellezza della parete longitudinale sinistra** rispetto a quella opposta e, quindi, una maggiore vulnerabilità rispetto ai movimenti fuori piano.

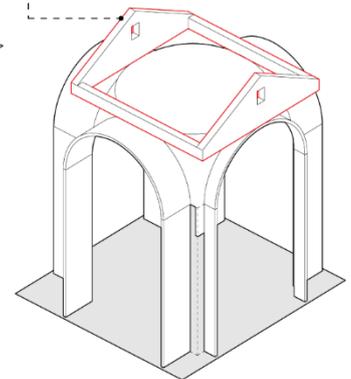
2 Il movimento descritto ha determinato il cedimento del supporto sinistro della volta, con la formazione di un **meccanismo di rottura flessionale asimmetrico** negli archi della navata centrale, con conseguente crollo degli stessi e della **volta a botte in camorcan-na** sovrastante.



3 Il movimento trasversale della chiesa ha, inoltre, provocato danni diffusi nella zona presbiteriale, quali il **ribaltamento delle pareti del transetto** e il **distacco** delle stesse rispetto alle volte a botte laterali.

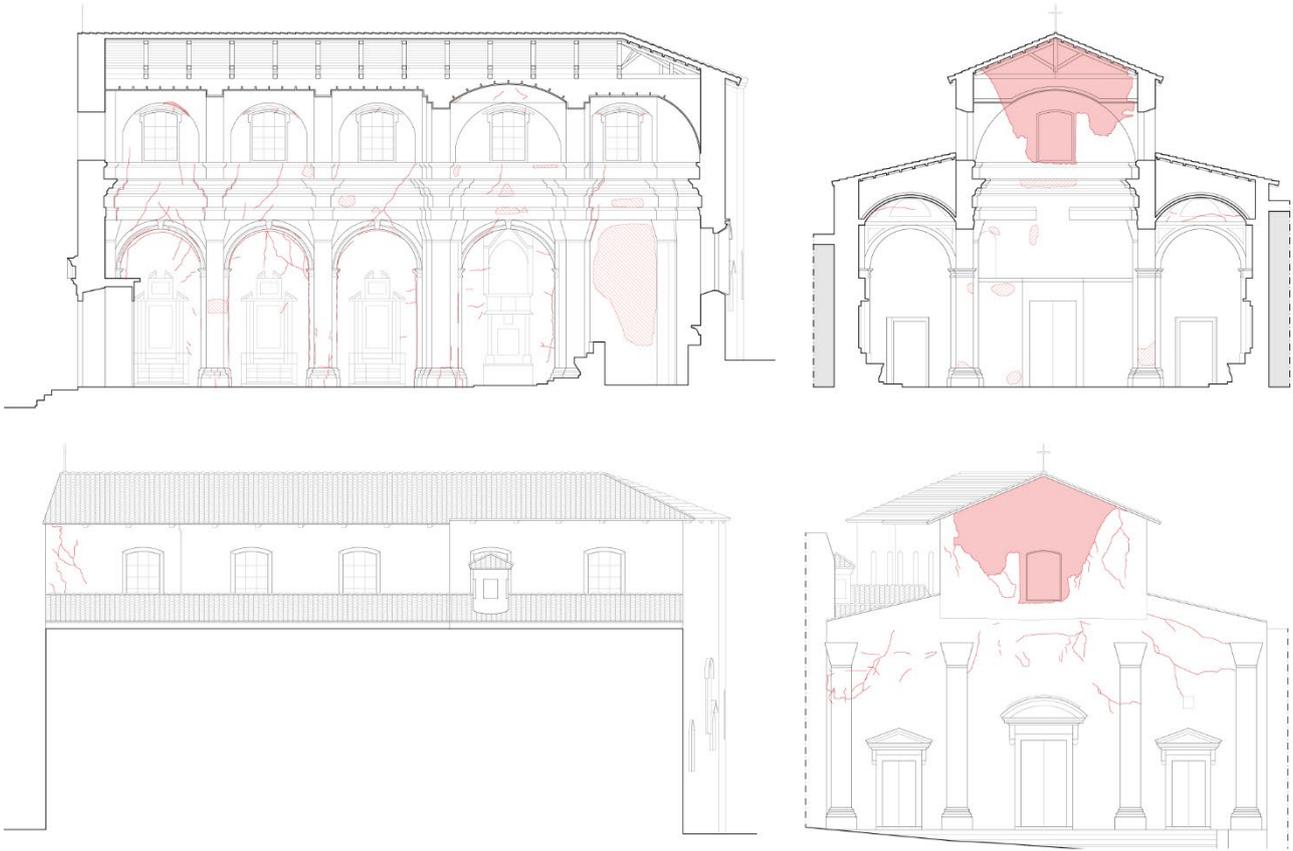


4 L'**anello sommitale** presente nella zona presbiteriale, che congloba anche i due timpani e finalizzato a irrigidire la struttura, è realizzato in **c.a.**, che si differenzia dal materiale murario per comportamento dinamico e peso specifico.

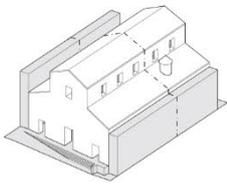


5 La presenza del pesante anello in c.a. ha probabilmente alterato il **quadro fessurativo della vela ribassata del presbiterio** rispetto ai meccanismi tipicamente osservabili in tali sistemi strutturali. La volta ha probabilmente risentito della rotazione rigida a cui è stato soggetto l'anello sommitale durante l'impulso sismico e dell'importante carico aggiuntivo ad esso dovuto.

Chiesa di San Giuseppe Artigiano rilievo del danno

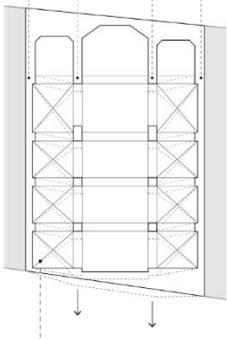


Chiesa di San Giuseppe Artigiano interpretazione del danno e cinematismi



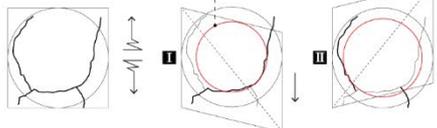
1 L'impulso in direzione longitudinale provoca un movimento relativo tra i **pareti A e B** e tra i **pareti D e C**. Il movimento di B e C, strutture di separazione tra la navata centrale e le laterali, comporta la traslazione rigida della prima e la deformazione delle seconde, vincolate esternamente dai fabbricati adiacenti.

A B C D



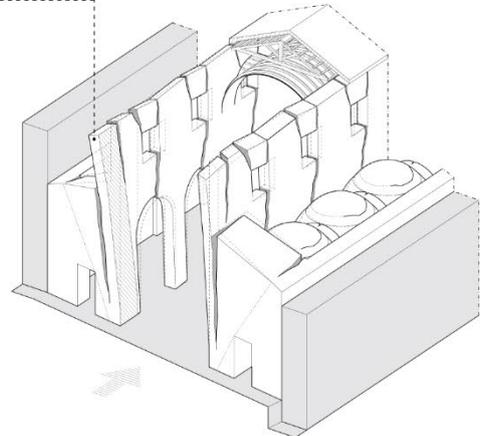
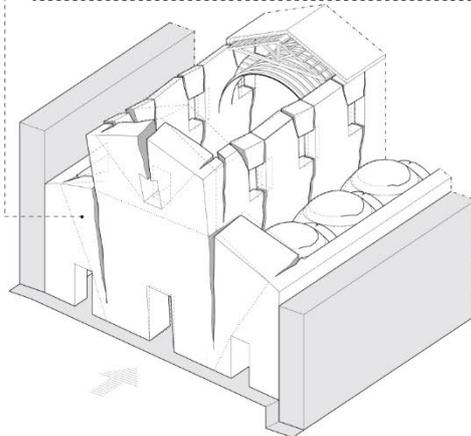
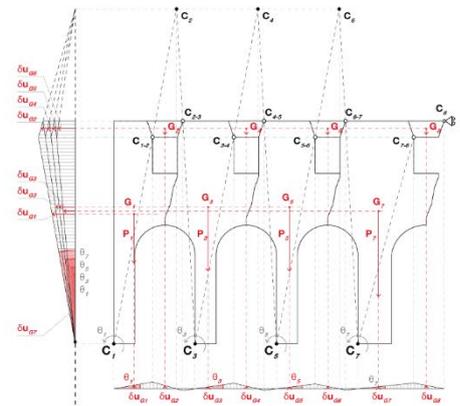
2 Il meccanismo sopra descritto provoca lo **scorrimento nel piano orizzontale delle volte** nelle campate laterali, con la comparsa di lesioni ortogonali alla diagonale che esibisce un movimento estensivo.

3 Il movimento dovuto all'impulso sismico è di tipo oscillatorio: entrambe le diagonali, alternativamente (casi I e II), subiscono movimenti estensivi, comportando la formazione di **lesioni tra loro ortogonali**. Esse presentano un **andamento circonfrenziale**, coerente con il modo di vibrare torsionale delle cupole.

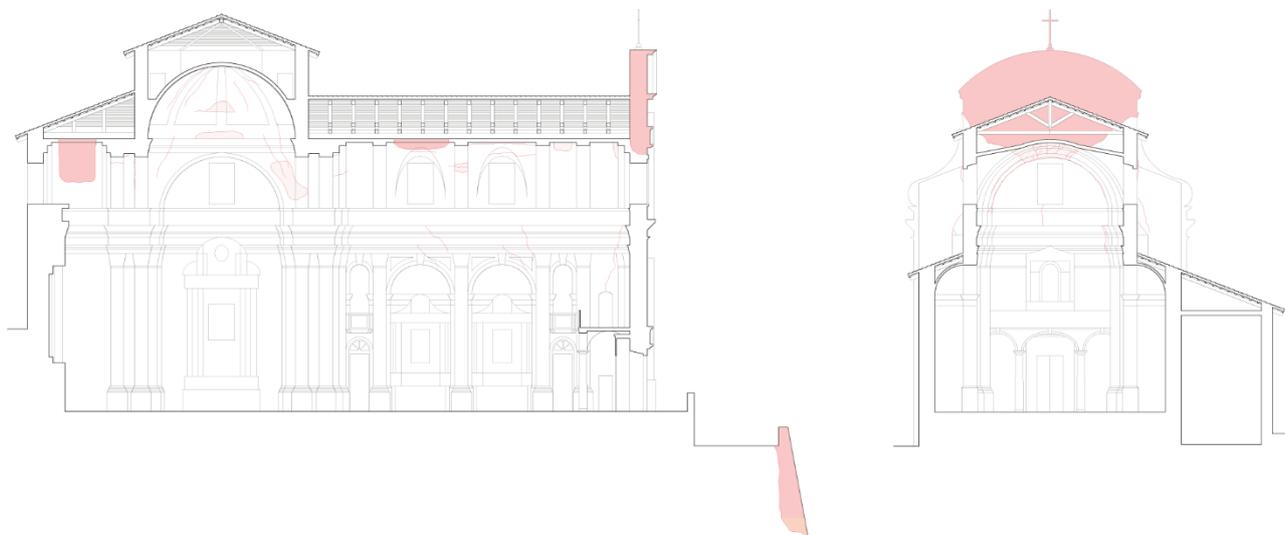


4 Le lesioni delle volte appaiono meno pronunciate in prossimità dell'abside, dove il movimento è stato minore, e nelle volte della navata destra, in corrispondenza della quale la **parete di facciata**, che presenta una sezione variabile, è più massiccia. Questo ha portato a un **ribaltamento asimmetrico** dell'elemento.

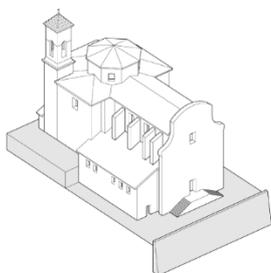
5 L'oscillazione longitudinale della parete della navata centrale ne determina la rottura a taglio con movimenti più pronunciati verso la facciata. L'**analisi cinematica** consente di analizzare graficamente questo comportamento e evidenziare le **differenze di rotazione** tra i diversi corpi, maggiori in prossimità della facciata ($\theta_1 > \theta_2 > \theta_3$).



Chiesa di Santa Maria dei Raccomandati rilievo del danno

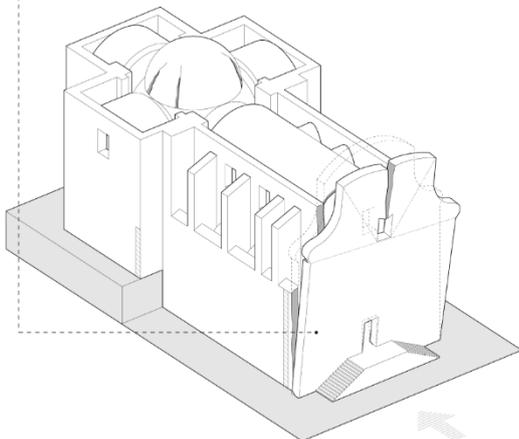


Chiesa di Santa Maria dei Raccomandati interpretazione del danno e cinematismi

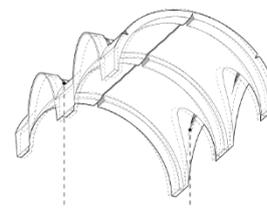
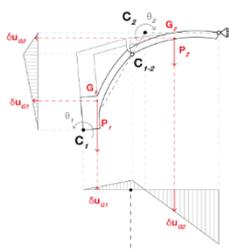


1 Dall'interpretazione del quadro fessurativo rilevato, è possibile osservare ingenti danni causati da un **impulso sismico** agente con medesima intensità in direzione sia **trasversale** che **longitudinale**. L'individuazione di una direzione prevalente dell'azione sismica deve, infatti, essere sempre confrontata con la **precarietà costruttiva** degli elementi danneggiati e con le vulnerabilità intrinseche legate all'impianto dell'edificio analizzato.

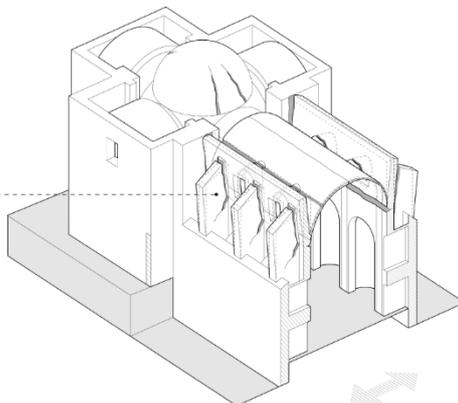
2 Il principale danno riconducibile all'impulso sismico in direzione longitudinale è il **ribaltamento simmetrico della facciata**. È possibile riconoscere due ulteriori movimenti fuori piano del secondo ordine dello stesso elemento e della porzione sommitale, con conseguente **crollò parabolico del timpano**, che svetta rispetto alla quota di innesto delle pareti longitudinali della navata.



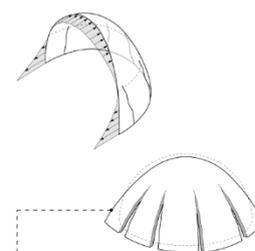
3 L'impulso trasversale ha causato il **movimento dei contrafforti**, che presentano lesioni di taglio, e il conseguente **movimento fuori piano delle pareti longitudinali**. Il cedimento delle strutture di imposta ha innescato un **meccanismo di crollo flessionale simmetrico degli archi e della volta a botte** della navata, con la conseguente formazione di lesioni in chiave intradosali e alle reni estradosali.



4 L'**analisi cinematica** della volta a botte della navata centrale, svolta considerandone una sezione che si configura come un arco ribassato, consente di giustificare graficamente la presenza di **lesioni intradosali nelle lunette** che, fratturandosi, subiscono i medesimi movimenti dei corpi rigidi che compongono l'arco.



5 L'ampiezza di tali lesioni è significativa. Considerando la geometria delle lunette, equiparabili alle **unghe** di una volta a crociera, è possibile ricondurre tali lesioni alle già citate **lesioni di Sabouret**.



6 La **composizione dei moti in direzione trasversale e longitudinale** ha prodotto un cedimento nelle strutture di imposta della **cupola presbiteriale**, alla base della quale sono sorti sforzi di tensione, secondo il più noto meccanismo che interessa tali sistemi strutturali. Tale movimento ha determinato la formazione di **lesioni disposte lungo i meridiani**.