



**Politecnico
di Torino**

Honors Thesis

Master's degree Architecture for Heritage

Abstract

**Seismic behaviour of vaulted systems
Recurring mechanisms in the 2009 L'Aquila earthquake**

Tutor

Prof. Cesare Tocci

Candidate

Francesca De Cola

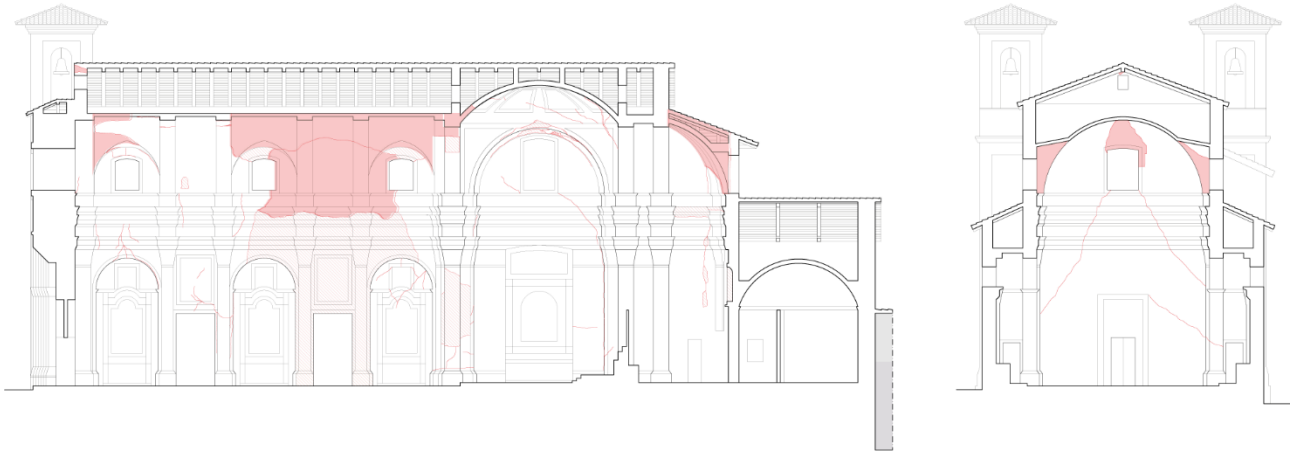
February 2024

Earthquakes have always constituted a threat to the historical architectural heritage, especially for the Italian territory, characterised by a high seismic hazard. The history of building has, therefore, always been, more or less consciously, conditioned by the need to guarantee the stability of buildings even in the presence consequences of an earthquake. More and more effective solutions, recognisable as an intentional response to the seismic problem from the 18th century onwards, have been developed over the centuries and have allowed historic buildings to survive even in very hostile seismic contexts. The intervention of modern mechanics has allowed this process to be founded on solid rational foundations, systematising it and extending it from masonry to other building types. The purpose of the research presented here is to analyse the seismic behaviour of historical masonry architecture and, in particular, of one of the building systems that most characterises it: vaulted structures. Knowledge of the mechanisms governing the collapse modes of vaulted systems is of fundamental importance for identifying their weaknesses and vulnerabilities and, consequently, for the definition of restoration works aimed at improving their seismic performance without distorting their technical-constructive characteristics. This knowledge is all the more necessary as modern materials seem to allow increases in the load-bearing capacity of vaulted systems that are not correlated with real structural needs.

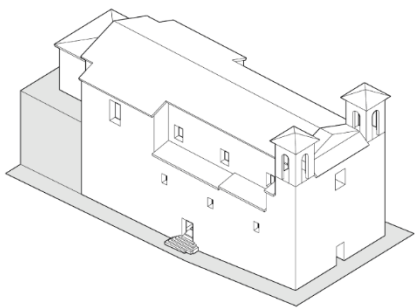
The research was carried out assuming as a case study the earthquake that devastated the L'Aquila area in April 2009 and limiting the analysis to religious buildings: the availability of a large amount of data, acquired both during the emergency phase and during reconstruction activities, has in fact made it possible to carry out an in-depth reading of the damage found in the selected churches and to understand the probable kinematics from which they originated. The work required the analysis of the historical and technical-constructive characteristics of the buildings and a more general study of the historical local seismicity and the evolution of antiseismic presences during the last centuries.

The recognition and categorisation of the recurring kinematics in the vaults of the L'Aquila churches are original results of the research and have been achieved by having as a reference, on the one hand, the theoretical apparatus deriving from the first eighteenth-century research on the statics of the arches and their subsequent inclusion in the conceptual framework of limit analysis and, on the other hand, the constructed reality of architecture, in a process in which the theoretical model supports the interpretation of the physical data and thus validated.

Chiesa di San Marco rilievo del danno

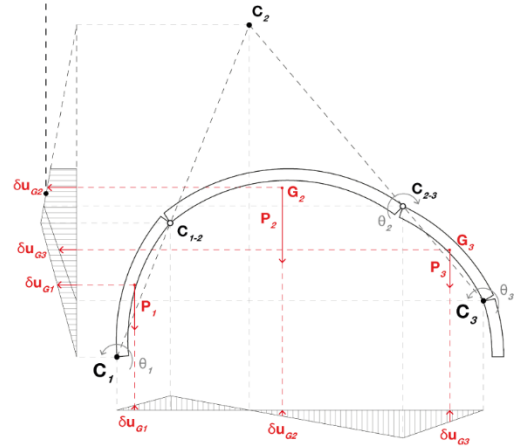


Chiesa di San Marco interpretazione del danno e cinematici

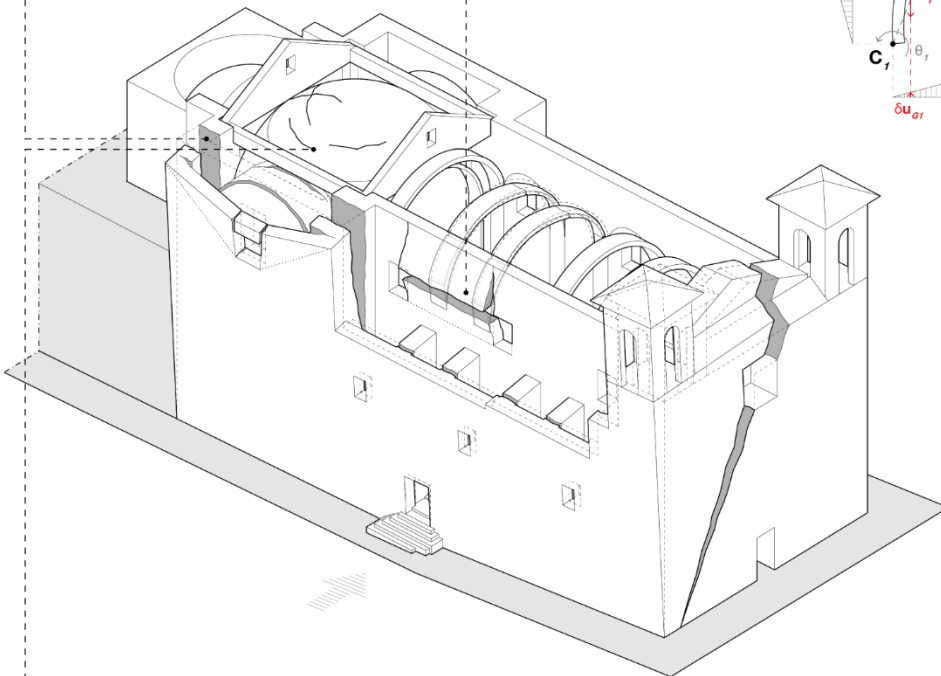


1 La **risposta trasversale dell'aula** è il meccanismo più severo; a questo è dovuto il crollo della parte superiore della parete del fianco sinistro. La localizzazione del crollo è dovuto sia al maggior impulso del sisma in direzione nord-sud che alla **maggior snellezza della parete longitudinale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

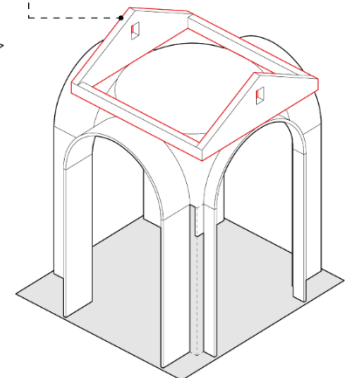
2 Il movimento descritto ha determinato il cedimento del supporto sinistro della volta, con la formazione di un **meccanismo di rottura flessionale asimmetrico** negli archi della navata centrale, con conseguente crollo degli stessi e della **volta a botte in camorcan-na** sovrastante.



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.

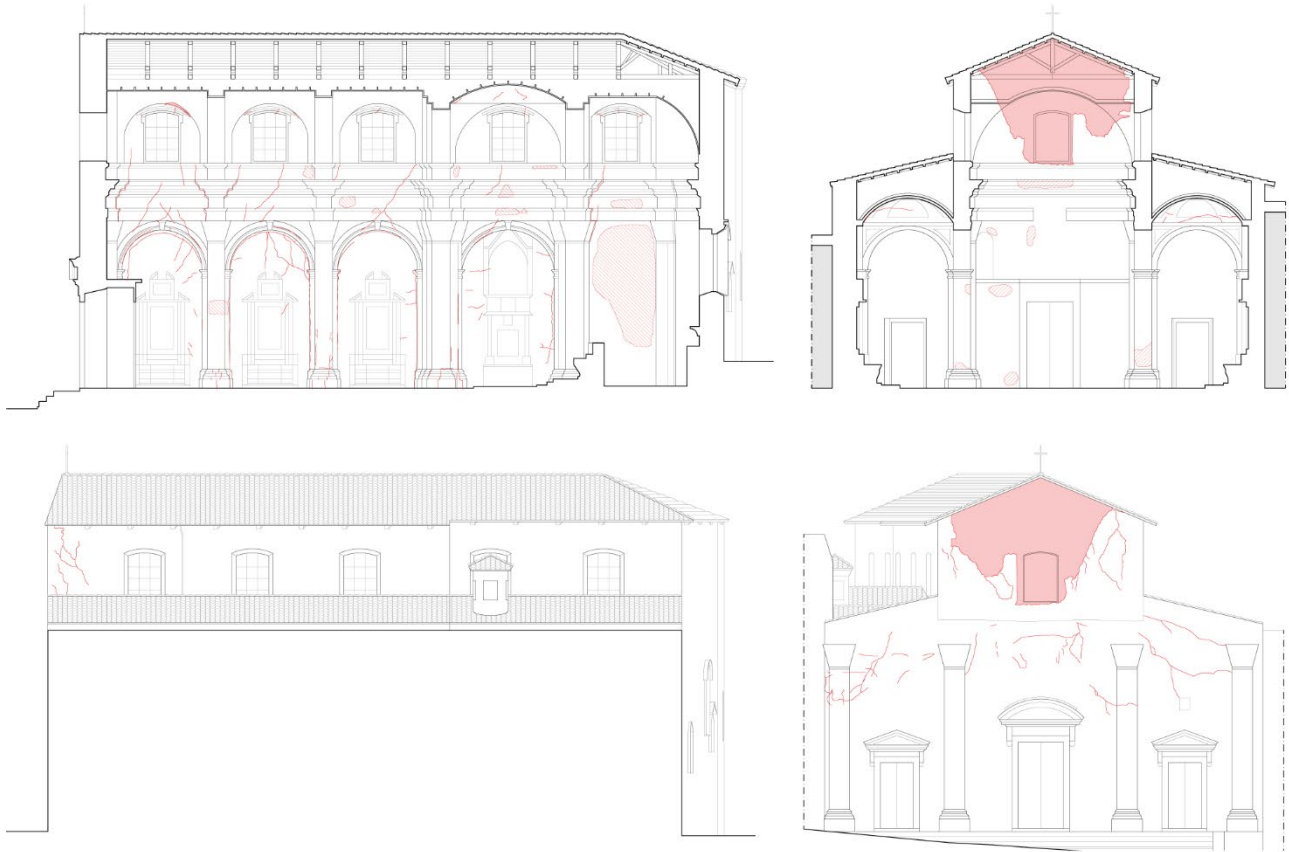


4 L'**anello sommitale** presente nella zona presbiteriale, che congloba anche i due timpani e finalizzato a irrigidire la struttura, è realizzato in **c.a.**, che si differenzia dal materiale murario per comportamento dinamico e peso specifico.

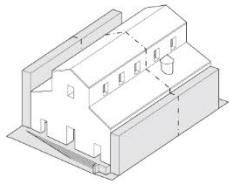


5 La presenza del pesante anello in c.a. ha probabilmente alterato il **quadro fessurativo della vela ribassata del presbiterio** rispetto ai meccanismi tipicamente osservabili in tali sistemi strutturali. La volta ha probabilmente risentito della rotazione rigida a cui è stato soggetto l'anello sommitale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

Chiesa di San Giuseppe Artigiano rilievo del danno

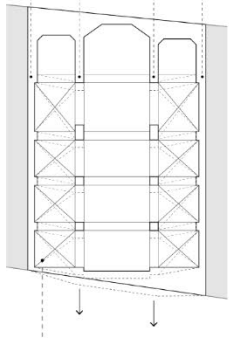


Chiesa di San Giuseppe Artigiano interpretazione del danno e cinematismi

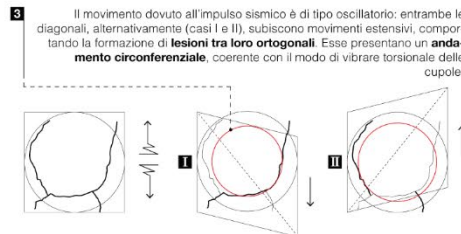


1 L'impulso in direzione longitudinale provoca un movimento relativo tra i **pareti A e B** e tra i **pareti D e C**. Il movimento di B e C, strutture di separazione tra la navata centrale e le laterali, comporta la traslazione rigida della prima e la deformazione delle seconde, vincolate esternamente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

A B C D

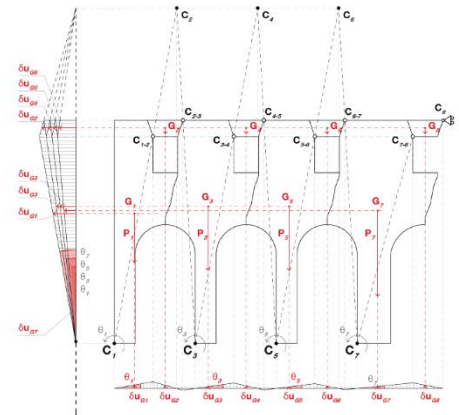
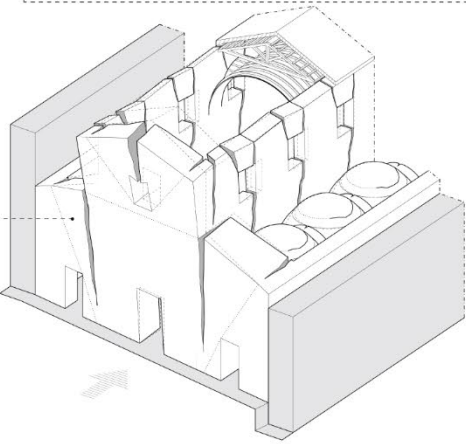


2 Il meccanismo sopra descritto provoca lo **scorrimento nel piano orizzontale delle volte** nelle campate laterali, con la comparsa di lesioni ortogonali alla diagonale che esibisce un movimento estensivo.

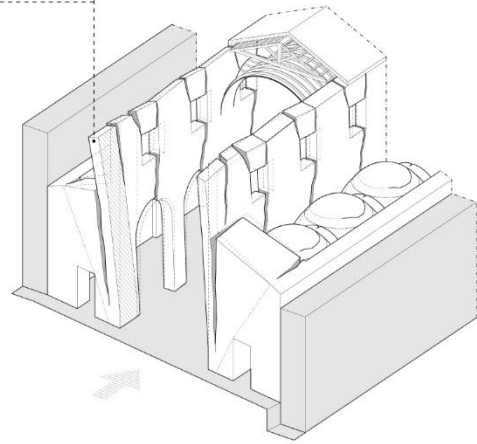


3 Il movimento dovuto all'impulso sismico è di tipo oscillatorio: entrambe le diagonali, alternativamente (casi I e II), subiscono movimenti estensivi, comportando la formazione di **lesioni tra loro ortogonali**. Esse presentano un **andamento circonfrenziale**, coerente con il modo di vibrare torsionale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

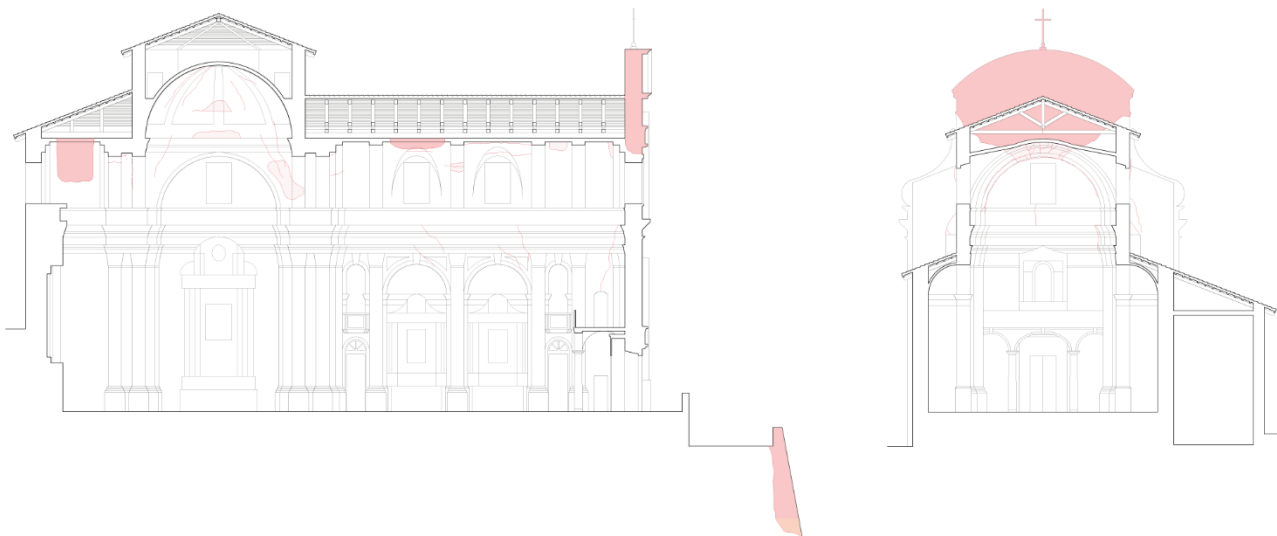
4 Le lesioni delle volte appaiono meno pronunciate in prossimità dell'abside, dove il movimento è stato minore, e nelle volte della navata destra, in corrispondenza della quale la **parete di facciata**, che presenta una sezione variabile, è più massiccia. Questo ha portato a un **ribaltamento asimmetrico**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



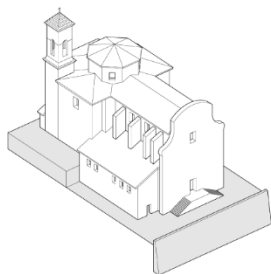
5 L'oscillazione longitudinale della parete della navata centrale ne determina la rottura a taglio con movimenti più pronunciati verso la facciata. L'**analisi cinematica** consente di analizzare graficamente questo comportamento e evidenziare le **differenze di rotazione** tra i diversi corpi, maggiori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



Chiesa di Santa Maria dei Raccomandati rilievo del danno

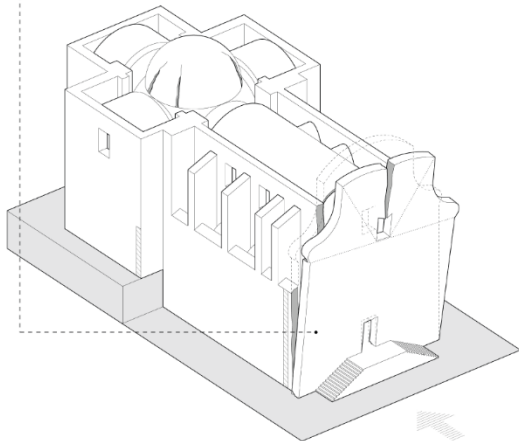


Chiesa di Santa Maria dei Raccomandati interpretazione del danno e cinematismi

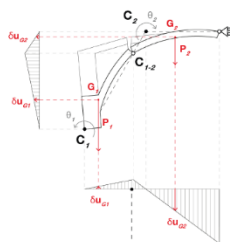


1 Dall'interpretazione del quadro fessurativo rilevato, è possibile osservare ingenti danni causati da un **impulso sismico** agente con medesima intensità in direzione sia **trasversale** che **longitudinale**. L'individuazione di una direzione prevalente dell'azione sismica deve, infatti, essere sempre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

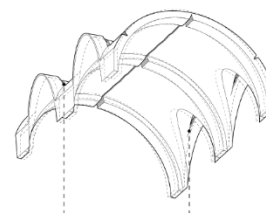
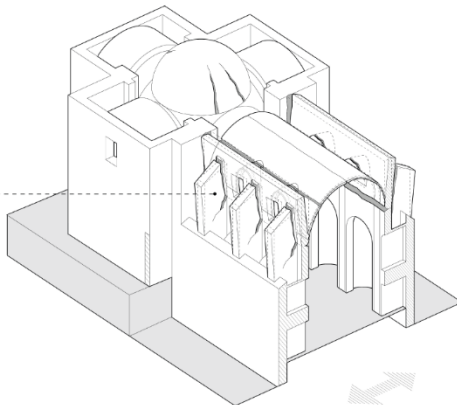
2 Il principale danno riconducibile all'impulso sismico in direzione longitudinale è il **ribaltamento simmetrico della facciata**. È possibile riconoscere due ulteriori movimenti fuori piano del secondo ordine dello stesso elemento e della porzione sommitale, con conseguente **crollo parabolico del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



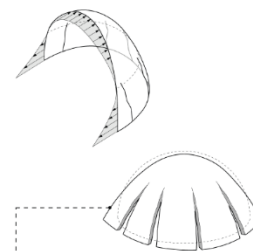
3 L'impulso trasversale ha causato il **movimento dei contrafforti**, che presentano lesioni di taglio, e il conseguente **movimento fuori piano delle pareti longitudinali**. Il cedimento delle strutture di imposta ha innescato un **meccanismo di collasso flessionale simmetrico degli archi e della volta 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 **ungchie** 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**.