



Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Architettura per il patrimonio

a.a. 2023/2024

Febbraio 2024

Comportamento sismico dei sistemi voltati

Meccanismi ricorrenti in occasione del
terremoto de L'Aquila del 2009

Relatore
Prof. Cesare Tocci

Candidata
Francesca De Cola



*“Ormai in quel lido, non altra opera umana si
compie che l’ultima; il seppellimento. Non si
aggirano tra le rovine se non fossori. E i fossori
sono militi, come dopo una battaglia. E fu invero
una battaglia quale mai non si raccontò nella
storia degli uomini. Una immensa torma di cavalli
[...] sembrò passare al galoppo, sottoterra,
nella fragorosa carica di un minuto. Una bocca
di fuoco sparò [...] col rombo di cento cannoni
in uno, nel cupo silenzio della notte. E il mare si
alzò di cinquanta metri, e la terra si abbassò e
poi balzò su. E un soffio vastissimo di luce rossa,
come un’improvvisa aurora boreale, alitò dal lido
opposto; e un astro o più astri si sgretolarono
in cielo. Fu una battaglia davvero, ma di Titani,
ridesti dal loro sonno millenario in fondo agli
abissi, e ritrovatisi in cuore la terribile loro collera
primordiale. Ora in quel campo di battaglia,
battaglia durata un attimo, dopo quindici giorni si
procede all’opera ultima e postuma.”*

Giovanni Pascoli

“La Società Fotografica Italiana, a perpetuo ricordo dell’Arte che sorrise nelle distrutte Città, del flagello che le annientò, della fratellanza umana che ne diminuì lo strazio, fece questo lavoro dedicandolo all’«Opera Nazionale di Patronato Regina Elena per gli Orfani del terremoto».”

In copertina: Società Fotografica Italiana, *Messina e Reggio prima e dopo il terremoto del 28 dicembre 1908*, Ristampa anastatica, «Fata Morgana», collezione libri rari su Messina, Libreria Bonazinga, Messina, 1977.

Indice

Abstract

Introduzione

1. Richiami teorici: elementi di meccanica delle strutture voltate in muratura	1
1.1 Muratura	2
1.1.I <i>Il materiale</i>	
1.1.II <i>La costruzione: regola dell'arte e criteri strutturali</i>	
1.2 Archi	6
1.2.I <i>Introduzione</i>	
1.2.II <i>Leve e catene: una statica per "oggetti"</i>	
1.2.III <i>L'arco come sistema rigido: teorie statiche del XVIII secolo</i>	
1.2.IV <i>La soluzione elastica</i>	
1.2.V <i>L'Analisi Limite</i>	
1.3 Cupole e volte	23
1.3.I <i>Sviluppi storici</i>	
1.3.II <i>Evoluzione dell'analisi statica</i>	
1.3.III <i>Gusci sferisci: cupola</i>	
1.3.IV <i>Gusci cilindrici: volta a botte, a crociera e a padiglione</i>	
2. Il contesto costruito: L'Aquila, l'evoluzione della città sismica	37
2.1 Introduzione alla sismicità locale	38
2.2 Una nuova città	41
2.2.I <i>Fondazione</i>	
2.2.II <i>Rifondazione</i>	

2.3	I terremoti storici	45
2.3.I	<i>3 dicembre 1351</i>	
2.3.II	<i>9 settembre 1349</i>	
2.3.III	<i>27 novembre 1461</i>	
2.3.IV	<i>2 febbraio 1703</i>	
2.4	L'evoluzione delle tecniche costruttive antisismiche	52
2.4.I	<i>Il terremoto come «causa»: prime riflessioni e accorgimenti antisismici</i>	
2.4.II	<i>Il terremoto come «effetto»: lo sviluppo dei primi presidi antisismici</i>	
2.5	I restauri moderni	63
2.5.I	<i>Continuità (XIX secolo)</i>	
2.5.II	<i>Frattura (XX secolo)</i>	
2.6	La chiesa come palinsesto costruttivo	67
	Schede tematiche	78
1	Eventi sismici dall'anno 1900 nell'area nazionale	
2	Eventi sismici dall'anno 1301 nell'area compresa entro 50 km da L'Aquila	
3	Pirro Ligorio e il primo prototipo di <i>casa antisismica</i>	
4	Le prime tecniche costruttive antisismiche	
5	Il <i>baraccato aquilano</i>	
3.	La ricerca: analisi del danno e interpretazione della risposta sismica dei sistemi voltati	87
3.1	6 aprile 2009	88
3.2	La standardizzazione del rilievo del danno	91
3.2.I	<i>Nuove analisi sismiche applicate al patrimonio architettonico</i>	
3.2.II	<i>Il Modello A-DC: obiettivi, punti di forza e criticità</i>	

3.3	Oggetto, metodologia e obiettivi della ricerca	95
3.4	Analisi dei casi studio: lettura e interpretazione del danno	101
3.4.I	<i>Inquadramento territoriale</i>	
3.4.II	<i>San Giuseppe Artigiano</i>	
3.4.III	<i>San Marco</i>	
3.4.IV	<i>Sant'Agostino</i>	
3.4.V	<i>Santa Maria degli Angeli</i>	
3.4.VI	<i>Santa Maria ad Cryptas</i>	
3.4.VII	<i>Santa Maria dei Raccomandati</i>	
3.5	Classificazione dei meccanismi di danno	169
3.5.I	<i>Meccanismo flessionale</i>	
3.5.II	<i>“a modo di mela granata”</i>	
3.5.III	<i>Scorrimento orizzontale</i>	
3.5.IV	<i>Archi “nascosti”</i>	

Conclusioni

Bibliografia

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.

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 anti-seismic presences during the last centuries.

The recognition and categorisation of the recurring kinematisms 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.

Introduzione

5 C. Tocci, *Il rapporto tra meccanica e architettura come tema di storia della costruzione*, in E. Piccoli, M. Volpiano, V. Burgassi (a cura di), *Quaderni di Storia della Costruzione, Vol. 1. Storia della costruzione: percorsi politecnici*, collana del Centro di Ricerca Construction History Group, Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, 2021, p. 51.

2 S. Di Pasquale, *Architettura e Terremoti*, prefazione in A. Guidotti, *Questioni di dinamica per il restauro dei monumenti*, Quaderni di restauro dei monumenti e di urbanistica dei centri antichi, «Edizioni Scientifiche Italiane», 11, 59-60-61, 1982.

3 *Idem*, p. 215.

La storia del costruire, come diceva Benvenuto, “*si inserisce nella storia dell’architettura come aspetto parziale e specialistico ma, al contempo, risulta ad essa sovraordinata in quanto espressione della più generale storia della scienza e della tecnica*”¹; essa si configura come specchio tangibile del cultura dei diversi contesti territoriali, esprimendone al contempo tradizione e nuove conquiste. Nel patrimonio architettonico storico di un luogo è possibile leggerei momenti di splendore e fragilità susseguirsi nel tempo e le reazioni sociali da questi determinate. In particolare, gli eventi catastrofici, le calamità naturali, condizionano l’evoluzione storico-costruttiva di un luogo.

Lo stretto legame tra Architettura e Terremoti, discusso da Di Pasquale in un suo saggio seminale², “*solo di recente ha preso corpo e consistenza dando luogo ad una crisi non ancora completamente risolta*”³. Il tema del *permanere* del patrimonio storico architettonico in zone dichiaratamente sismiche, analizzato dal punto di vista della stabilità e della resistenza, ricopre un ruolo di estrema attualità nel più ampio dibattito della conservazione, della tutela e della valorizzazione dei beni storico architettonici. L’accentuata fragilità e complessità che contraddistinguono le fabbriche murarie storiche sono dovute ai caratteri di stratificazione e di frammentarietà costruttiva, dirette conseguenze dei frequenti, spesso violenti, eventi sismici che hanno costellato la storia del nostro Paese. Inesorabilmente,

questi hanno contribuito a forgiare la cultura, non solo costruttiva, dei popoli che per secoli hanno dovuto affrontarne le conseguenze. La comprensione, intesa in senso olistico, delle fabbriche storiche, la conoscenza delle vicissitudini che hanno condotto alla loro fondazione, l'analisi delle trasformazioni subite nel corso dei secoli, il riconoscimento delle tecniche costruttive originarie e di quelle integrate o «sovrapposte» successivamente e lo studio del comportamento meccanico delle stesse concorrono alla piena consapevolezza del valore del manufatto storico e sono, pertanto, strettamente necessarie per un'adeguata attività di tutela, che rispetti la dignità dell'edificio.

Negli ultimi decenni, la ripresa degli studi della manualistica e delle tecniche storiche ha consentito di dare una nuova chiave di lettura all'analisi del comportamento strutturale delle fabbriche murarie storiche, utilizzando un nuovo tipo di approccio basato su un lavoro incrociato di rilettura delle teorie storiche e attenta osservazione della realtà costruttiva. Si tratta di un processo che inizia dopo i terremoti del Friuli e dell'Irpinia quando, per la prima volta, è possibile sperimentare al vero l'efficacia delle tecniche di consolidamento fino ad allora usate. Scandito da tappe significative, come l'istituzione della Commissione Ballardini⁴, e caratterizzato dall'impegno di alcune straordinarie figure di studiosi, questo processo conduce a una revisione critica, invero non del tutto lineare e condivisa, delle tipologie di intervento che, sull'onda della fiducia accordata ai nuovi materiali (allora era il c.a.), avevano sfigurato e snaturato parte

4 C. Galli, *Precedenti storici e orientamenti della normativa sismica dei beni culturali. Regole dell'arte, intuizione e calcolo numerico*, XV Convegno ANIDIS, L'ingegneria sismica in Italia, Padova, 2013.

5 Leon Battista Alberti, *De re aedificatoria*, edizione curata da P. Portoghesi e G. Orlandi sull'*Editio princeps* del 1485, Il Profilo, Milano, 1966, L. X., in S. Di Pasquale, *Architettura e... op. cit.*, p. 12.

6 S. Di Pasquale, *Architettura e... op. cit.*, p. 50.

del patrimonio architettonico storico situato in zone ad alta pericolosità sismica, compromettendone altresì l'integrità strutturale. *“Tra le cause [dei dissesti] alcune sono ben visibili; altre più oscure, e in tal caso non è chiaro che cosa convenga fare più quando il danno non si sia manifestato [...]. Cause evidenti di pericolo per un muro si avranno, ad esempio, quando questo sia troppo sottile [...]. Quelle cause invece che sono nascoste e si manifestano in modo imprevedibile sono: i terremoti, i fulmini, e ogni mutamento naturale della conformazione del terreno. Ma la causa fondamentale della maggioranza è la trascuratezza degli uomini”*⁵.

Non nei più moderni e raffinati modelli matematici ma nelle antiche teorie, evolutesi a partire dal XVIII secolo, Di Pasquale, Benvenuto e Giuffrè, principali autori degli studi prima citati, hanno trovato una chiave di lettura per l'analisi meccanica degli organismi murari, il cui funzionamento strutturale viene indagato partendo dai progetti e dai ragionamenti degli antichi costruttori e architetti del passato; *“nulla vi è di nuovo se non ciò che si è dimenticato”*⁶.

La ricerca qui presentata ha per oggetto l'analisi del comportamento sismico dell'architettura muraria storica, in particolare, di uno dei sistemi costruttivi che maggiormente la caratterizzano: le strutture voltate. L'indagine assume come caso studio il terremoto che nell'aprile del 2009 ha sconvolto il territorio aquilano, limitando l'analisi all'edilizia religiosa.

La città de L'Aquila, le cui origini medievali sono ancora ben radicate nel tessuto urbano e nell'edilizia

cittadina, presenta un'interessante e travagliata storia, che vede la città impegnata in un continuo ricostruirsi e reinventarsi a causa degli innumerevoli eventi sismici susseguitisi nel corso dei secoli, rimanendo sempre fedele a sé stessa.

Questo ha richiesto un notevole sforzo di adeguamento delle proprie architetture, tramite la sperimentazione di nuove soluzioni tecniche in grado di soddisfare le rinnovate esigenze di carattere sismico, la cui efficienza è stata, periodicamente e tragicamente, messa alla prova dal più inflessibile dei giudici. L'analisi dell'evoluzione dei primi presidi antisismici in tale area e l'osservazione del conseguente carattere stratigrafico dell'edilizia aquilana appaiono, pertanto, di notevole interesse. Il terremoto del 2009 ha tragicamente costituito l'ultimo «collaudo» delle architetture storiche aquilane, le cui risposte sono state varie e influenzate da una moltitudine di fattori, primo fra tutti, probabilmente, gli invasivi restauri condotti durante l'ultimo secolo.

Il riconoscimento e la categorizzazione dei cinematismi ricorrenti nelle volte delle chiese aquilane, conseguiti tramite un processo nel quale la modellazione teorica indirizza la lettura dei danni sismici e questi suggeriscono le scelte di modellazione più realistiche, aprono interessanti spunti di riflessione.



Richiami teorici

elementi di meccanica delle strutture voltate in muratura

1.1 Muratura

1.1.I Il materiale

1.1.II La costruzione: regola dell'arte e criteri strutturali

1.2 Archi

1.2.I Introduzione

1.2.II Leve e catene: una statica per "oggetti"

1.2.III L'arco come sistema rigido: teorie statiche del XVIII secolo

1.2.IV La soluzione elastica

1.2.V L'Analisi Limite

1.3 Cupole e volte

1.3.I Sviluppi storici

1.3.II Evoluzione dell'analisi statica

1.3.III Gusci sferici: cupola

1.3.IV Gusci cilindrici: volta a botte, a crociera e a padiglione

1.1 Muratura

1.1.1 Il materiale

Impiegata già in epoca arcaica, circa ottomila anni fa, la muratura diventa tecnica prevalente nelle prime grandi civiltà urbane in sostituzione di materiali quali legno, paglia e pelli per consentire la realizzazione di edifici più solidi e duraturi.

Può essere definita come un materiale composito non omogeneo, assemblaggio di blocchi di varia natura che ne determinano le principali caratteristiche di resistenza e deformabilità; l'ampia varietà di blocchi che possono essere impiegati spazia da elementi artificiali, principalmente laterizi, caratterizzati prevalentemente da dimensioni standard, a blocchi in pietra naturale, ottenuti tramite il taglio delle rocce, di dimensioni fortemente variabili e con superfici più o meno squadrate e levigate. I blocchi sono spesso, ancorché non necessariamente, assemblati con l'ausilio di malte, anch'esse di diversa natura, la cui principale funzione non consiste nell'aumentare la resistenza dell'apparecchio ma nell'assorbire le irregolarità superficiali dei blocchi, favorendo una trasmissione degli sforzi continua e omogenea. L'impiego di legante non è strettamente necessario: numerose sono le testimonianze di costruzioni a secco, di frequente realizzazione nell'edilizia storica. Altro

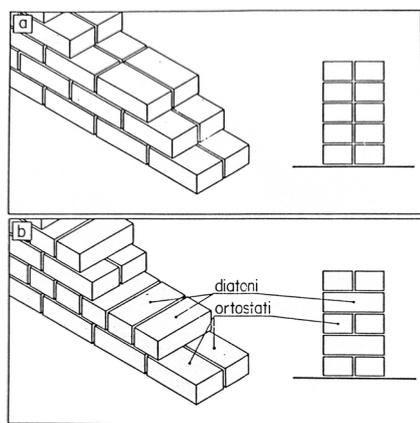


Fig. 1.1. Apparecchio di una parete muraria, in evidenza i diatoni e gli ortostati. A. Giuffrè, *Lecture sulla Meccanica delle Murature Storiche*, Kappa, Roma, 1991, Cap 1, tav. 4.

In copertina: *La caduta dei giganti*, dettaglio, G. Romano, Palazzo Te, Sala dei Giganti, Mantova. E. Guidoboni (a cura di), *I terremoti prima del Mille in Italia e nell'area mediterranea*, Storia, Archeologia, Sismologia, SGA Storia-Geofisica-Ambiente, Bologna, 1989, p. 243.

fondamentale aspetto delle costruzioni murarie consiste nelle tecniche di assemblaggio degli elementi che le compongono: oggetto di una lenta evoluzione nel corso dei millenni, le varie tipologie di apparecchi murari sono accomunate da caratteri ricorrenti, defi-

niti da diversi trattatisti, le quali “*regole sottolineano i seguenti requisiti: la necessità di realizzare l’ingranamento delle pietre attraverso lo spessore del muro usando con frequenza i «diatoni», pietre disposte con la loro maggior lunghezza trasversalmente al muro; la opportunità di circondare ogni pietra di malta ma senza eccesso, riempiendo con pietre più piccole e scaglie di mattone gli spazi di risulta tra quelle più grandi; la necessità di costruire a intervalli regolari uno spianamento del letto di posa in modo da realizzare periodici orizzontamenti della giacitura delle pietre*”¹ (fig. 1.1).²

1.1.II La costruzione: regola dell’arte e criteri strutturali

Il principale fattore della costruzione muraria risiede nella sua forma: un’attenta analisi dei caratteri geometrici delle architetture murarie storiche è, infatti, la chiave per approcciarsi alla cosiddetta “*scienza nascosta*”³ della statica di tali costruzioni. A lungo il dimensionamento strutturale si è basato su regole geometriche affinate attraverso “*l’analisi degli insuccessi e dei successi precedenti*”⁴; per questo Giuffrè definisce l’architettura storica come non “*meccanicamente controllata*”⁵ secondo la moderna concezione: la sicurezza non era affidata a controlli numerici, come impongono le odierne normative, ma alla cosiddetta regola dell’arte⁶. Definita come “*un complesso di regole costruttive obiettivamente definite, anche se non scritte, a cui le singole costruzioni possono essere confrontate*

1 A. Clementi, E. Piroddi, *L’Aquila*, «Le città nella storia d’Italia», collana diretta da C. De Seta, Laterza, Roma-Bari, 1986, p. 12.

2 Per approfondimenti: J. Heyman, *Lo scheletro di pietra. Ingegneria strutturale dell’architettura in muratura*, EPC, Roma, 2014, Capitolo 1; C. Carocci, C. Tocchi (a cura di), *Antonino Giuffrè. Leggendo il libro delle antiche architetture. Aspetti statici del restauro, saggi 1985-1997*, Gangemi, Roma, 2010, Capitolo 3; M. Como, *Statica delle costruzioni storiche in muratura. Archi, volte, cupole, architetture monumentali*,

3 M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, p. 104.

4 *Idem*, p. 106.

5 C. Carocci, C. Tocchi (a cura di), *Antonino Giuffrè. Leggendo... op. cit.*, p. 34.

6 Il concetto, coniato per primo da Giuffrè, è ormai ampiamente riconosciuto e diffuso.

7 C. Carocci, C. Tocci (a cura di), *Antonino Giuffrè. Leggendo... op. cit.*, p. 37.

8 *Idem*, p. 38.

9 J. Heyman, *Lo scheletro... op. cit.*, p. 9.

*per controllarne la coerenza*⁷, essa contiene *“implicitamente la verifica di sicurezza. Noi usiamo ancora questo criterio quando prescriviamo nelle norme sismiche per le nuove costruzioni in muratura gli spessori, gli interassi, le altezze dei muri e degli edifici [...] In fondo quelle prescrizioni non fanno che perpetuare la tipologia più frequente nei nostri centri storici*⁸. Grazie a un processo durato secoli, le primitive intuizioni si sono trasformate in principi e regole costruttive e, solo nel XX secolo, sono state valutate sulla base di principi meccanici.

È ad Heyman che si deve un inquadramento rigoroso della statica delle costruzioni murarie all'interno del quadro concettuale dell'analisi limite, rinunciando alla pretesa di studiare in dettaglio lo stato tensionale della muratura e preoccupandosi che siano rispettati solo criteri di carattere generale: resistenza, rigidità, stabilità. In particolare, egli afferma che *“la struttura deve essere abbastanza resistente da portare qualsiasi carico le sia applicato, incluso il suo peso proprio; non si deve deformare indebitamente; e non deve sviluppare ampi spostamenti instabili, siano essi locali o globali. Se questi tre criteri possono essere soddisfatti, allora il progettista può scorrere una lista di stati limiti secondari, per assicurarsi che la struttura sia adeguata alla sua funzione di servizio*⁹.

Per analizzare le strutture murarie in termini di stati limite, è necessario formulare tre ipotesi, relative al comportamento strutturale, riportate di seguito.

“*La muratura non ha resistenza a trazione*”¹⁰, definita come ipotesi *conservativa*: i blocchi esibiscono resistenza a trazione ma il materiale legante è estremamente debole. La scarsa, quasi nulla, resistenza a trazione, viene definita da Como come “*la chiave che condiziona profondamente il comportamento delle strutture murarie*”¹¹; è, infatti, questa peculiarità che giustifica il dimensionamento in chiave geometrica delle strutture in muratura.

“*Gli sforzi sono così bassi che la muratura ha a tutti gli effetti una resistenza a compressione illimitata*”¹², ipotesi valida, precisa Heyman, se riferita a *sforzi medi*. È, infatti, possibile che le strutture murarie siano soggette a concentrazioni di sforzo che determinano delle *sofferenze* locali, evidenziate da spaccature o scheggiature superficiali, lontane comunque dal provocare il collasso globale della struttura. Come verrà successivamente descritto, infatti, la principale modalità di collasso è determinata dal “*perdersi dell’equilibrio nella struttura*”¹³: se la risultante delle sollecitazioni agenti induce sforzi di trazione, non supportabili dalla struttura, si assiste prima alla formazione di meccanismi e, in casi estremi, al collasso.

“*Non si verifica il collasso per slittamento*”¹⁴: è sufficiente un iniziale e ridotto sforzo di compressione per consentire alla struttura muraria di mantenere, grazie a meccanismi attrattivi, la sua geometria invariata nel tempo.

10 *Idem*, p. 18.

11 M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, p. 105.

12 J. Heyman, *Lo scheletro... op. cit.*, p. 18.

13 M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, p. 155.

14 J. Heyman, *Lo scheletro... op. cit.*, p. 18.

15 M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, p. 114.

16 *Idem*, p. 114.

17 T. Vicente Tosca, *Compendio matematico* in S. Huerta, *Mechanics of masonry vaults: the equilibrium approach*, in P. B. Lourenço, P. Roca (a cura di), *Historical Constructions. Possibilities of numerical and experimental techniques*, Universidade do Minho, Guimarães, Portogallo, 2001, p. 47.

18 Già la civiltà minoica realizzava archi con tessitura orizzontale, definiti falsi archi perché trasmettono alle imposte azioni esclusivamente verticali.



Fig. 1.2, Porta etrusca di Volterra, M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, p. 208.

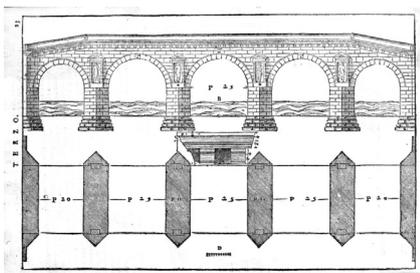


Fig. 1.3, Rappigurazione di Palladio di un ponte romano. M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, p. 209.

È oggi possibile affermare che il modello più prossimo al comportamento strutturale dell'organismo murario è quello “*rigido a compressione non reagente a trazione*”¹⁵, definito da Heyman e approfondito da molti studiosi; approssimandole a questo modello, Como afferma che “*le strutture murarie sviluppano solo deformazioni puramente estensive, diffuse o concentrate, e danno luogo a campi di spostamento, cosiddetti da meccanismo. Il corpo murario può allora essere rappresentato come un assemblaggio di elementi rigidi in pietra o in laterizio tenuti insieme dalle forze di compressione prodotte dal loro peso*”¹⁶.

1.2 Archi

1.2.1 Introduzione

“*The most subtle and exquisite part of Architecture [...] is the formation of every sort of Arches and vaults, cutting their stones, and adjusting them which such artifice, that the same gravity and weight which should have precipitate them to the earth, maintain them constantly in the air, supporting one another in virtue of the mutual complication which links them, and in such a way close above masonry buildings with all safety and strength.*”¹⁷

I primi esempi di strutture ad arco con disposizione radiale¹⁸ dei conci risalgono a tempi lontani: per primi gli assiri e i babilonesi sperimentarono tali costruzioni tra il VII e il VI secolo a.C., anche se si deve agli etruschi il loro uso sistematizzato (fig. 1.2). Con

i romani si ebbe poi l'impiego rigoroso degli archi, principalmente a tutto sesto, per la realizzazione dei nuovi sistemi infrastrutturali dell'impero (fig. 1.3).¹⁹

*“Possiamo anzitutto dire che l'arco è un elemento costruttivo a profilo curvilineo, adottato per creare un vano e in grado di sostenere i carichi della struttura sovrastante con sole sollecitazioni di compressione”*²⁰.

Como definisce la costruzione arcuata come “[...] la struttura che meglio di tutte esprime con la sua geometria la genialità dei caratteri della resistenza di una struttura muraria”²¹: l'affermazione è esplicativa del fenomeno che si verifica all'interno delle strutture murarie. Come verrà successivamente descritto, infatti, Heyman per primo afferma che tutte le costruzioni murarie sottendono al loro interno degli archi *virtuali*, funicolari degli sforzi di compressione a cui sono soggetti.

1.2.II *Leve e catene: una statica per “oggetti”*²²

Prima del XVIII secolo, una teoria statica sulle strutture spingenti in muratura non era ancora stata formulata; nonostante ciò, i principali aspetti del loro comportamento erano comunque stati chiaramente compresi da diversi autori. Benvenuto²³ cita Vitruvio²⁴ e Alberti e riporta le considerazioni di Viollet le Duc sulla sapienza dei costruttori medievali, detentori di un *“istinto di una teoria assai raffinata”*²⁵, che consigliavano di approssimare la geometria degli archi alla forma della curva delle pressioni, la cui definizione viene approfondita solo durante i secoli

19 M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, Capitolo 3.

20 *Idem*, p. 205.

21 *Idem*, p. 205.

22 A. Giuffrè, *La meccanica nell'architettura. La statica*, La Nuova Italia Scientifica, Roma, 1986, p. 200.

23 E. Benvenuto, *La scienza delle costruzioni e il suo sviluppo storico*, Edizioni di Storia e Letteratura, Roma, 2008, Capitolo 9.

24 Nel sesto dei Dieci libri sull'Architettura, per primo Vitruvio intuì l'effetto spingente esercitato dai sistemi voltati: “[...] devono farsi i pilastri estremi più larghi, affinché possano aver forza di resistere ai conj, che spinti dal peso dei muri, premendosi per le connessioni al centro, caccerebbero fuori le imposte”. L'architettura di Vitruvio tradotta da Q. Viviani, Fratelli Mattiuzzi, Udine, 1830 in A. Giuffrè, *La meccanica... op. cit.*, p. 202.

25 E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, p. 323.

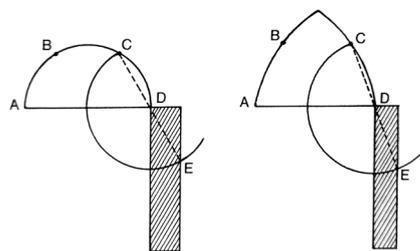


Fig. 1.4, Differenti dimensionamento dello spessore dei piedritti in base alla geometria di arco impiegata; la paternità di tale intuizione risulta ignota e, quindi, attribuita alla cultura costruttiva medievale. B. A. Vittone, *Istruzioni elementari per indirizzo dei giovani allo studio dell'Architettura*, Lugano, 1760 in E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, p. 323.

26 R. Marcolongo, *Studi Vinciani*, SIEM, Napoli, 1937, p. 237 in E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, p. 324.

27 *Idem*, p. 239 in E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, p. 324.

28 M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, p. 212.

29 Heyman attribuisce per primo la paternità della formulazione della teoria della catenaria ad Hooke, basando su di essa il suo teorema relativo all'Analisi Limite e riconoscendone l'importanza; "si può considerare che tale risultato segni la nascita della statica delle strutture in muratura". M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, p. 212.

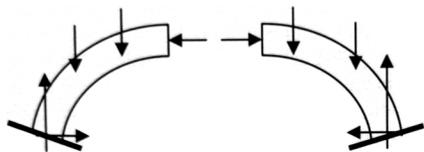


Fig. 1.5, "Essenza statica dell'arco". R. Marcolongo, *Studi Vinciani... op. cit.* in M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, p. 211.



Fig. 1.6, Strumento ideato da Leonardo da Vinci per misurar la spinta dell'arco esercitata alle imposte. R. Marcolongo, *Studi Vinciani... op. cit.* in M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, p. 211.

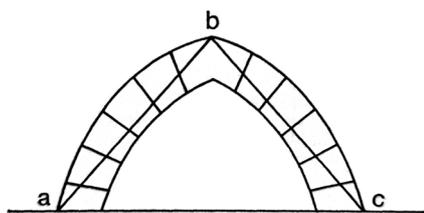


Fig. 1.7, E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, p. 324.

successivi, per dimensionare lo spessore dei piedritti (fig. 1.4).

Tra le riflessioni storiche riportate da Benvenuto, fanno eccezione quelle di Leonardo da Vinci, le cui considerazioni presentano geniali intuizioni, che verranno codificate solo tre secoli dopo. "Arco non è che una fortezza causata da due debolezze, imperoché l'arco negli edifici è composto di due quarti in circolo, [...] ciascuno debolissimo per sé desidera cadere, e opponendosi alla ruina l'uno dell'altro, le due debolezze si convertono in una unica fortezza"²⁶ (figg. 1.5, 1.6); tuttavia, il metodo di dimensionamento dello spessore dell'arco suggerito da Leonardo è di natura geometrica: "l'arco non si romperà, se la corda dell'archi di fori non tocherà l'arco di dentro"²⁷ (fig. 1.7).

"[...] ut pendet continuum flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum"²⁸ (fig. 1.8); nell'intuizione di Hooke²⁹, espressa sotto forma di anagramma³⁰, la configurazione assunta da una fune flessibile, soggetta unicamente al proprio peso, è la medesima rispetto a quella di un arco in muratura sollecitato da soli sforzi di compressione. Il modello resistente dell'arco concepito da Hooke e la sua intuizione relativa alla curva funicolare dei carichi fu oggetto di numerosi studi che si susseguirono nell'arco del XVIII secolo, tra i quali quelli di Huygens, Pardies, Leibniz e Bernoulli (figg. 1.9, 1.10), a cui si deve la formulazione matematica della catenaria: "preso un qualunque suo punto G, la risultante di tutte le forze

applicate sulla catenaria a sinistra di G – e quindi la risultante del peso del tratto di catenaria compreso tra il suo punto di sospensione B e il punto G e della reazione esplicita dal punto di sospensione B – passa proprio per G e di conseguenza è tangente ad essa^{31, 32}.

1.2.III L'arco come sistema rigido: teorie statiche del XVIII secolo

Giuffrè e Benvenuto sottolineano come, fino al XVIII secolo, la meccanica evolvesse mediante un “linguaggio di oggetti”³³: i problemi legati alla stabilità dell'arco erano stati analizzati “per approssimazioni successive a diverse «macchine semplici»”³⁴: la leva e il piano inclinato; è De la Hire che aggiunge “alla «grammatica» espressiva l'altra macchina semplice: il cuneo”³⁵.

Il merito di De la Hire è, infatti, quello di concepire l'arco come un sistema di blocchi rigidi e di applicare la teoria di Hooke per analizzarne la statica e, per primo, le modalità di collasso. Nella sua *Proposition 125*³⁶ egli conduce l'analisi statica di un arco scomposto in conci, determinando il carico a cui ognuno di essi è soggetto e costruendo, di conseguenza, la geometria della funicolare dei carichi (fig. 1.11). Nell'analisi non si fa menzione della spinta che l'arco esercita all'imposta, tema trattato nel secondo lavoro di De la Hire. Nel *Sur la construction des voûtes dans les édifices*³⁷, viene, infatti, introdotto il tema che definirà lo sviluppo dell'analisi statica degli archi nel

30 R. Hooke, *A description of helioscopes and some other instruments*, Londra, 1675 in J. Heyman, *Lo scheletro di... op. cit.*

31 M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, p. 212.

32 Per approfondimenti: E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, Capitolo 6.

33 A. Giuffrè, *La meccanica... op. cit.*, p. 200.

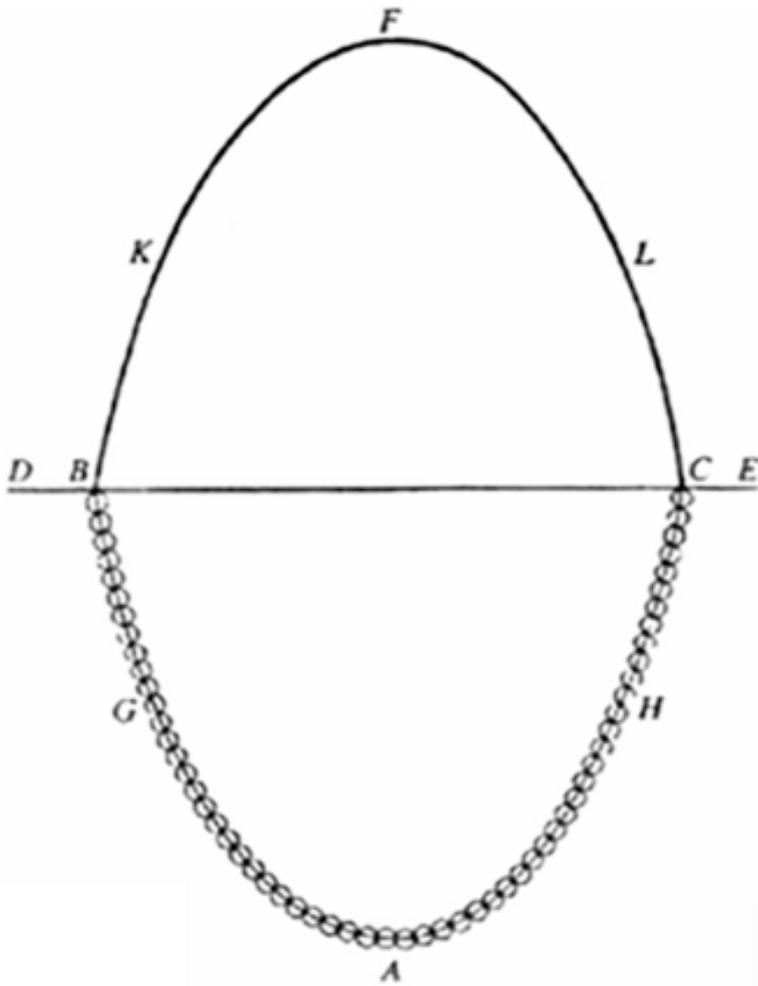
34 F. Ottoni, *Delle cupole e del loro tranello. La lunga vicenda delle fabbriche cupolate tra dibattito e sperimentazione*, Aracne, Roma, 2012, p. 343.

35 E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, p. 326.

36 P. de la Hire, *Traité de Mécanique*, Parigi, 1730 in E. Benvenuto, *La scienza delle... op. cit.*

36 P. de la Hire, *Traité de Mécanique*, Parigi, 1730 in E. Benvenuto, *La scienza delle... op. cit.*

37 P. de la Hire, *Sur la construction des voûtes dans les édifices*, Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, Parigi, 1712 in E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*



“[...] ut pendet continuum flexile, sic stabit contiguum rigidum inversum”

Fig. 1.8, “La catena appesa di Hooke”. J. Heyman, *Lo scheletro... op. cit.*, p. 12.

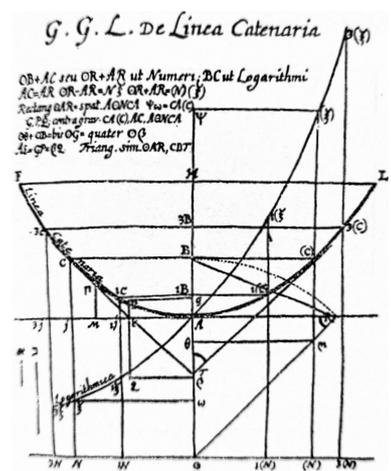
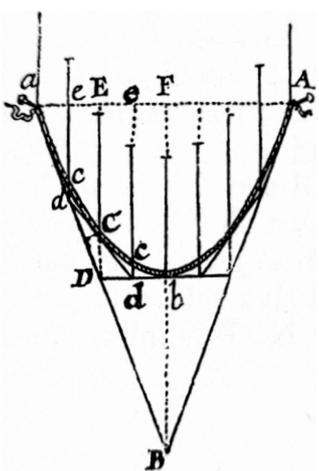


Fig. 1.9, 1.10, Alcune analisi e studi di Pardies e Leibniz sulla catenaria. E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, pp. 186-187.

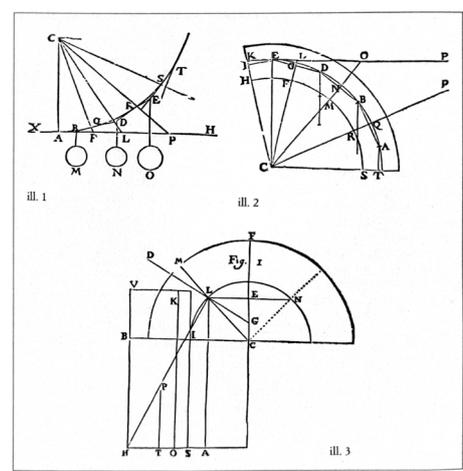


Fig. 1.11, Analisi della funicolare dei carichi secondo De la Hire. A. Becchi, F. Foce, *Degli archi e delle volte. Arte del costruire tra meccanica e stereotomia*, Marsilio, Venezia, 2002, p. 138.

XVIII secolo: lo studio dei meccanismi di collasso e degli stati limiti ad essi relativi. In particolare, la modalità di rottura proposta da De la Hire prevede un cinematismo per scorrimento: la sua ipotesi iniziale prevedeva “*che i giunti [tra i conci dell’arco] siano infinitamente lisci e che possano scivolare l’uno contro l’altro senza impedimento alcuno*”³⁸; egli assume che il “*cervello*”³⁹, la porzione dell’arco posta in chiave, “*si comporti come un cuneo tra superfici prive di attrito*”⁴⁰, scorrendo sui piani di appoggio, posti a 45° dal piano di imposta, ed esercitando su di essi una spinta, trasmessa al piedritto, che subisce un ribaltamento secondo il comportamento di una leva equivalente (fig. 1.12). La “*teoria del cuneo*”⁴¹ viene sostenuta anche da Belidor che, nel suo più celebre trattato⁴², propone una rilettura della teoria, a cui rimane fedele, differendone per una diversa ipotesi circa la leva equivalente (fig. 1.13), finalizzata al dimensionamento dello spessore del piedritto; la validità delle formulazioni di De la Hire, il cui merito consiste nell’aver “*introdotto per la prima volta i metodi della meccanica nel progetto degli archi*”⁴³, viene contestata da Couplet, che avanza la proposta di un nuovo meccanismo di collasso.⁴⁴

Nelle sue due memorie⁴⁵, Couplet, già avviato nello studio relativo alle spinte del terreno di cui traspone in parte le soluzioni, riprende l’analisi di De la Hire, introducendo “*l’engrènement entre les Voussoirs*”⁴⁶, inteso come fattore che impedisce lo scorrimento lungo i giunti. Attenendosi a questa assunzione, Couplet ipotizza un meccanismo di collasso che

38 E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, p. 329.

39 A. Giuffrè, *La meccanica nell... op. cit.*, p. 205.

40 *Idem*, p. 205.

41 E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, p. 335.

42 B. Forest de Belidor, *La science des Ingénieurs dans la conduite des travaux de fortification et d’architecture civile*, Parigi, 1729 in E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*

43 A. Giuffrè, *La meccanica nell... op. cit.*, p. 209.

44 Riferimenti per gli studi di De la Hire: J. Heyman, *Il saggio di Coulomb sulla statica. Un contributo alla storia dell’Ingegneria Civile*, «Fonti», collana diretta da A. De Simone, G. Viaggiani, Hevelius, Benevento, 1999, Capitolo 6; E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, Capitolo 9; A. Giuffrè, *La meccanica... op. cit.*, Capitolo 6; M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, Capitolo 3; F. Foce, *Sulla teoria dell’arco murario. Una rilettura storica critica*, in A. Becchi, F. Foce, *Degli archi... op. cit.*; F. Ottoni, *Delle cupole... op. cit.*, Capitolo 7.

45 A. Couplet, *De la poussée des voûtes*, Académie Royale des Sciences, Parigi, 1729 e A. Couplet, *Seconde partie de l’examen de la poussée des voûtes*, Académie Royale des Sciences, Parigi, 1730 in E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*

45 A. Couplet, *De la poussée des voûtes*, Académie Royale des Sciences, Parigi, 1729 e A. Couplet, *Seconde partie de l’examen de la poussée des voûtes*, Académie Royale des Sciences, Parigi, 1730 in E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*

46 A. Couplet, *Seconde partie de... op. cit.*, p. 118 in E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, p. 338.

47 J. Heyman, *Il saggio... op. cit.*, p. 193.

48 L'errore a cui si fa riferimento nel testo consiste nell'ipotizzare che le cerniere si formino a 45° , medesimo angolo di frattura riportato nella teoria del cuneo.

49 Riferimenti per gli studi di Couplet: J. Heyman, *Il saggio... op. cit.*, Capitolo 6; E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, Capitolo 9; F. Ottoni, *Delle cupole... op. cit.*, Capitolo 7.

50 A. Giuffrè, *La meccanica nell... op. cit.*, p. 210.

51 E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, p. 327.

52 *Idem*, p. 327.

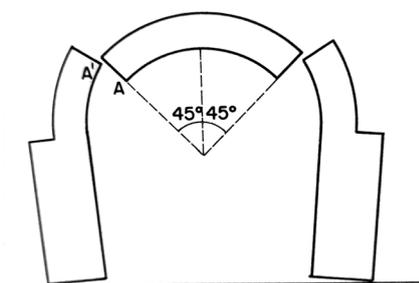


Fig. 1.12, Meccanismo di collasso proposto da De la Hire. A. Giuffrè, *La meccanica... op. cit.*, p. 204.

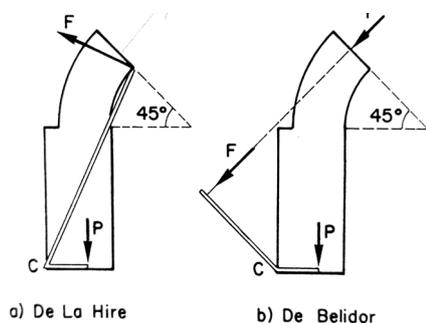


Fig. 1.13, Confronto tra le leve equivalenti individuate da De la Hire e Belidor, che si differenziano principalmente per il punto di applicazione della reazione del "cervello". A. Giuffrè, *La meccanica... op. cit.*, p. 205.

prevede una mutua rotazione dei conci, intorno a determinati punti definiti dallo stesso come cerniere (fig. 1.14); esplicita, inoltre, che il meccanismo si attiva solo “*se la corda tracciata in corrispondenza della mezzeria dell’estradosso non interseca l’intradosso, ma è contenuta all’interno dell’arco*”⁴⁷, ponendosi in continuità con l’antica immagine vinciana. La geniale intuizione, pur non essendo sostenuta da dimostrazioni analitiche più rigorose, anche a causa di un’ipotesi errata ereditata da De la Hire⁴⁸, diviene il punto di riferimento per numerosi studi, quali quelli di Danyzy, che ne dimostra sperimentalmente le teorie, e Frézier (fig. 1.15).⁴⁹

Benvenuto e Giuffrè pongono l’accento su un’interessante tema di riflessione: le “due culture” del progetto e della verifica⁵⁰, che caratterizzano il florido sviluppo degli studi del XVIII secolo; verso la metà del secolo si assiste, infatti, al “*rovesciamento del problema statico*”⁵¹ che vede l’iniziale subordinazione del progetto alle considerazioni di natura statica, quando il problema a cui rispondere era “*la definizione della forma corrispondente alle ipotesi statiche assunte*”⁵², invertire i termini: durante la seconda metà del secolo, “*il controllo della stabilità diviene una operazione successiva al progetto*”⁵³, privando così il progettista della razionalizzazione nell’atto di progettare, e ponendo un nuovo problema nell’arte del costruire, ossia la determinazione della “*sollecitazione reale di una struttura assegnata*”⁵⁴. È possibile ritrovare tale concetto esplicitato nelle parole di Coulomb: “[...] *ho cercato di individuare*

[...] i valori limite delle forze che sarebbe possibile applicare ad un arco di dimensioni assegnate”⁵⁵, parole, inoltre, utili, a introdurre lo studio condotto dallo stesso autore.

“Le formule ricavate senza tener conto dell’attrito e della coesione dei giunti non possono essere di alcuna utilità pratica; a questa considerazione sono giunti tutti gli studiosi di Geometria che si sono occupati di questo argomento. Per ottenere risultati utilizzabili, essi sono stati costretti a basare i loro calcoli su ipotesi ritenute più aderenti alla realtà. Queste ipotesi consistono in genere nel considerare le volte suddivise in più parti. Poiché tale suddivisione viene fatta in maniera praticamente arbitraria, mediante l’applicazione delle regole di massimo e minimo io ho cercato di individuare quali sarebbero i veri punti di rottura di un arco troppo sottile, ed i valori limite delle forze che sarebbe possibile applicare ad un arco di dimensioni assegnate”⁵⁶ (fig. 1.16). Le parole introduttive all’*Essai*⁵⁷ di Coulomb esprimono, in maniera chiara e diretta⁵⁸, il metodo e gli obiettivi dello scienziato. Definendo come “sterile”⁵⁹ il problema affrontato da De la Hire, egli adotta la logica dei massimi e dei minimi per analizzare l’equilibrio di un semiarco per i quattro meccanismi, di scorrimento (verso l’interno o l’esterno) o rotazione (attorno all’intradosso o estradosso), al variare della posizione angolare del giunto, ottenendo come meccanismo più critico quello flessionale (fig. 17). Gli studi di Coulomb vengono però ricordati, più che per l’analisi appena descritta, ritenuta parzialmente incompleta

53 A. Giuffrè, *La meccanica nell... op. cit.*, p. 210.

54 E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, p. 327.

55 J. Heyman, *Il saggio... op. cit.*, p. 43.

56 *Idem*, p. 43.

57 C. Coulomb, *Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l’Architecture*, 1776 in J. Heyman, *Il saggio... op. cit.*

58 Benvenuto esalta le qualità di sintesi e chiarezza degli scritti di Coulomb, commentando che “nel giro di qualche pagina, Coulomb riesce a dire l’essenziale, sistemando quel che era già noto, risolvendo completamente nuove questioni [...], proponendo all’attenzione degli scienziati le linee di ricerca che si sarebbero dovute intraprendere”. E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, p. 343.

59 J. Heyman, *Il saggio... op. cit.*, p. 89.

60 E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.* e A. Becchi, F. Foce, *Degli archi... op. cit.*

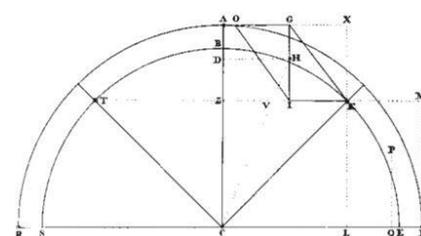


Fig. 1.14, Formazione delle cerniere necessarie per l’attivazione di un meccanismo di collasso identificate da Couplet. J. Heyman, *Il saggio... op. cit.*, p. 193.

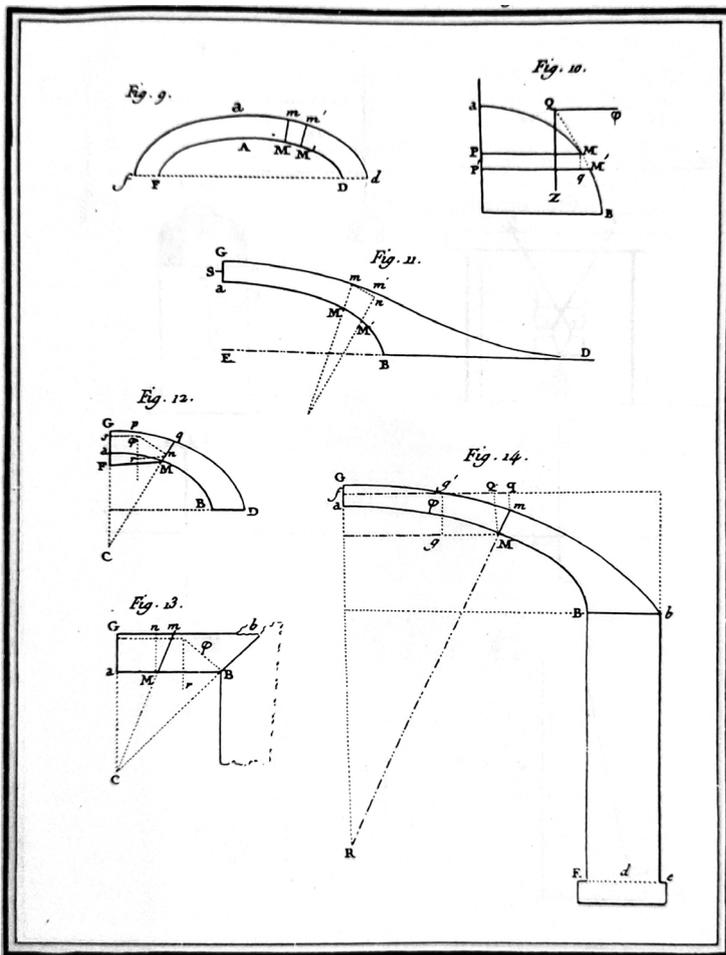
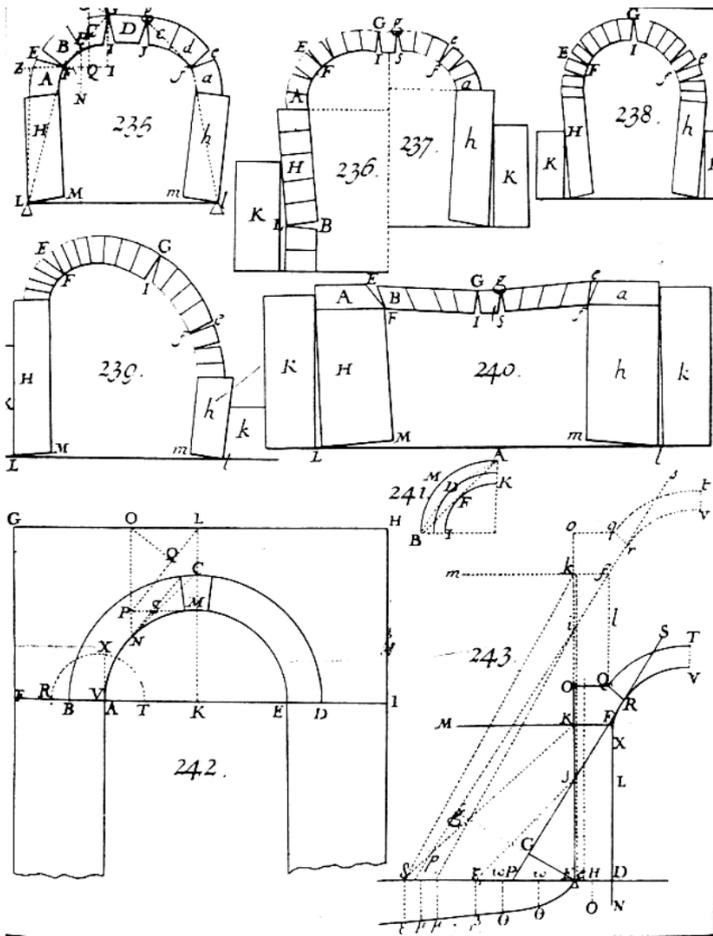


Fig. 1.15, Meccanismi di collasso illustrati da Frézier nel suo trattato *La théorie et la pratique de la coupe des pierres et des bois*, 1737. J. Heyman, *Il saggio... op. cit.*, p. 196.

Fig. 1.16, Disegni relativi alle teorie esposte da Coulomb. J. Heyman, *Il saggio... op. cit.*, p. 40.

dalla bibliografia⁶⁰ che riconosce i meriti di aver sviluppato in maniera esaustiva il tema a Mascheroni, per la formulazione analitica della forza di attrito; tema cardine del suo trattato, definita come forza coercitiva, viene ora introdotta in maniera rigorosa nell'analisi del comportamento strutturale degli archi.⁶¹

Nell'opera⁶² di Lorenzo Mascheroni, figura poliedrica, il tema dell'equilibrio degli archi viene affrontato con una consapevolezza moderna. *“Nascendo l'equilibrio dalla eguaglianza delle forze; noi verremo a considerare il rapporto, che possono avere tra loro due forze contrarie facendo seguire per supposizione il moto di due centri di gravità per due linee infinitesime da una parte, e dall'altra: l'uno de' quali due moti sia effetto dell'altro”*⁶³; le mature considerazioni esposte da Mascheroni ripercorrono la logica del principio dei lavori virtuali, analisi che consiste nella *“ricerca della condizione di moto non attivato esprimibile attraverso l'annullarsi del lavoro di quei pesi in corrispondenza di un movimento virtuale del loro punto di applicazione”*⁶⁴ (fig. 1.18). Se in altri studi della cultura scientifica italiana del settecento era chiaro che il principio meccanico sotteso seguisse le linee indicate da questa metodologia, come nel lavoro dei tre matematici sulla cupola di San Pietro e dello stesso Boscovich sul Duomo di Milano, solo con Mascheroni se ne ha una sistematizzazione. La trattazione prende avvio con l'analisi cinematica dei cosiddetti sistemi rettilinei⁶⁵, propedeutica all'approfondimento dei meccanismi di collasso dell'arco, di cui si offre un quadro generale. *“[...] son compresi i moti tutti*

61 Riferimenti per gli studi di Coulomb: J. Heyman, *Il saggio... op. cit.*, Capitolo 6; E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, Capitolo 9; M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, Capitolo 3; F. Foce, *Sulla teoria... op. cit.*; F. Ottoni, *Delle cupole... op. cit.*; Capitolo 7.

62 L. Mascheroni, *Nuove ricerche sull'equilibrio delle volte*, Locatelli, Bergamo, 1785 in E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*.

63 *Idem*, pp. 3-4 in A. Becchi, F. Foce, *Degli archi... op. cit.*, pp. 147-148.

64 A. Becchi, F. Foce, *Degli archi... op. cit.*, p. 148. Benvenuto dà un'elegante definizione di tale principio, descrivendolo come il “crinale tra i due «mondi»” della geometria e della statica. E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, p. 469.

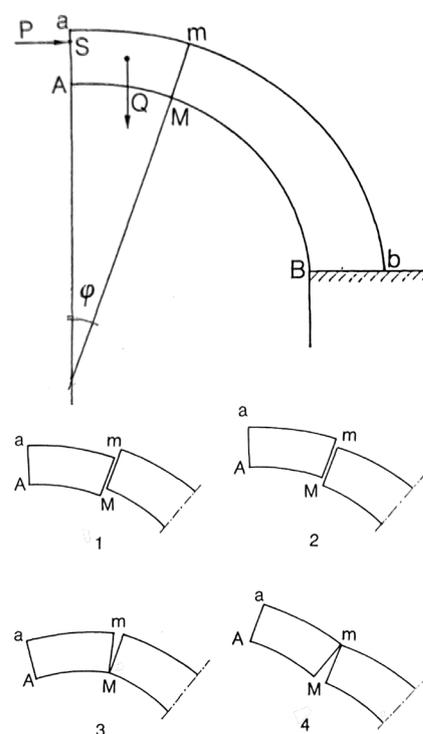


Fig. 1.17, Meccanismi di rottura identificati da Coulomb: scorrimento e rotazione, entrambi considerati come movimenti sia di caduta sia di sollevamento. E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, p. 362.

65 Sistemi a un grado di libertà composti da una o più aste incernierate tra loro, passibili di moto rigido. A. Becchi, F. Foce, *Degli archi...* op. cit., p. 148.

66 *Idem*, pp. 153-154.

67 Riferimenti per gli studi di Mascheroni E. Benvenuto, *La scienza...* op. cit., Capitolo 9; A. Giuffrè, *La meccanica...* op. cit., Capitolo 6; F. Foce, *Sulla teoria...* op. cit.; F. Ottoni, *Delle cupole...* op. cit., Capitolo 7.

68 J. Heyman, *Il saggio...* op. cit., Capitolo 6; F. Foce, *Sulla teoria...* op. cit.

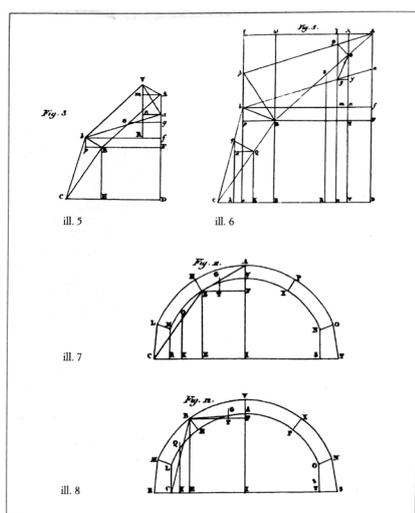


Fig. 1.18, Analisi dei rettilinei e meccanismi di collasso per rotazione elaborati da Mascheroni. A. Becchi, F. Foce, *Degli archi...* op. cit., p. 150.

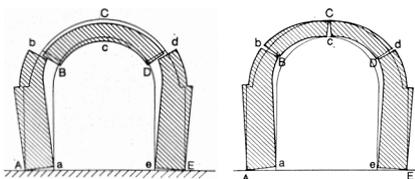


Fig. 1.19, 1.20, Meccanismi di collasso per scorrimento e rotazione di Mascheroni rielaborati da Benvenuto. E. Benvenuto, *La scienza...* op. cit., pp. 372-373.

di questi due pezzi d'arco; perché non possono se non che o tutti due sdrucchiolare parallelamente a se stessi [...], o tutti e due aver moto di rotazione [...], o l'inferiore aver moto di rotazione sdrucchiolando il superiore [...], o sdrucchiolar l'inferiore, rotandosi il superiore. Schivando tutti questi pericoli sarà sicuro tutto l'arco"⁶⁶ (figg. 1.19, 1.20); le conclusioni dello studio di Mascheroni prevedono, quindi, la formazione di quattro meccanismi di collasso, ognuno dei quali considerato nei due moti opposti, che, seppur non ugualmente probabili, necessitano una verifica per avere conferma della stabilità dell'arco.⁶⁷

Relativamente ai numerosi studi susseguiti nel corso del XVIII secolo, è interessante porre l'accento su un aspetto attinente alla diffusione degli scritti e delle teorie: è, infatti, possibile notare una mancanza di continuità nella trasmissione degli studi messi a punto. Diversi autori citati, tra cui Heyman e Foce⁶⁸, evidenziano alcuni casi del fenomeno in questione: il mancato riferimento di Coulomb alle intuizioni di Couplet, dimenticate da metà del XVIII secolo per poi essere riprese da Lamé e Clapeyron per la verifica della cupola di Sant'Isacco a San Pietroburgo ne è un esempio, come anche il grande seguito delle teorie di Coulomb, a scapito delle più complete analisi di Mascheroni. Il tema della diffusione degli scritti e, di conseguenza, dell'influenza che questi grandi intellettuali, appartenenti al medesimo periodo, hanno avuto l'un l'altro potrebbe sicuramente rappresentare un interessante tema di ricerca.

1.2.IV La soluzione elastica

All'alba del XIX secolo, il comportamento strutturale dell'arco era, quindi, stato oggetto di intensi studi, che non erano però stati in grado di trovare soluzione a tutti i quesiti posti dal modello rigido. Gli interrogativi rimasti irrisolti erano strettamente connessi alla così definita "indeterminazione statica"⁶⁹: l'iperstaticità dell'arco non consente, infatti, di risolvere univocamente la struttura, determinandone il passaggio interno degli sforzi – la posizione della catenaria – e, di conseguenza, le reazioni vincolari, avvalendosi unicamente delle equazioni di equilibrio. Nel XIX secolo, diversi studi si propongono di porre rimedio a tali «lacune»; Moseley⁷⁰ fu il primo "esponente del tentativo fallace, ma fecondo, di aggiungere alle condizioni di equilibrio statico un nuovo criterio di scelta fondato sui massimi e sui minimi"⁷¹, enunciando il principio della minima resistenza⁷², che, applicato alla statica degli archi, afferma che, "tra le infinite curve di pressione che possono essere tracciate all'interno delle curve di intradosso e di estradosso dell'arco, quella vera è quella che rende minima la spinta orizzontale in chiave"⁷³. Altro celebre tentativo fu quello di Mery⁷⁴ che, sfruttando la statica grafica⁷⁵, tramite una semplice costruzione geometrica, consente di identificare la curva delle pressioni, imponendo il suo passaggio per punti prestabiliti e senza che la sezione si parziali, quindi limitandolo entro il suo nocciolo d'inerzia, il *terzo medio* (fig. 1.21). Gli studi ottocenteschi qui citati sono solo i più celebri ma è possibile trovare un fattore comune: la

69 E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, p. 389.

70 H. Moseley, *On the theory of arch, in The theory practice and architecture of bridges*, J. Weale, 1843 in E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*

71 E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, p. 389.

70 H. Moseley, *On a new principle in statics called the principle of least pressure*, Phil. Mag., 1833 in E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*

73 A. Giuffrè, *La meccanica... op. cit.*, p. 226.

74 E. Mery, *Sur l'équilibre des voûtes en berceau*, Annales des Ponts et Chaussées, 1840 in E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*

75 Per approfondimenti: E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, Capitolo 18.

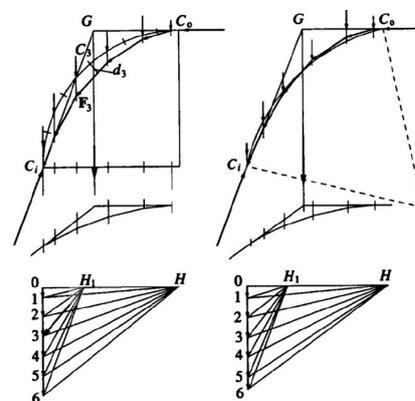


Fig. 1.21, Costruzione del poligono funicolare formulata da Mery per un arco a tutto sesto e uno a sesto acuto. A. Giuffrè, *La meccanica... op. cit.*, p. 219.

76 Per approfondimenti: J. Heyman, *Lo scheletro... op. cit.*, Capitolo 1; J. Heyman, *The science of Structural Engineering*, Imperial College Press, Londra, 1999; E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, Capitolo 9; A. Giuffrè, *La meccanica... op. cit.*, Capitolo 6; M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, Capitolo 3; S. Huerta, *Mechanics of masonry... op. cit.*

77 E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, p. 418.

78 Il testo che maggiormente influenzò l'ingegneria del XIX secolo è *Résumé des Leçons données à l'École des Ponts et Chaussées sur l'application de la mécanique*, 1826.

79 E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, p. 418.

80 J. Heyman, *Lo scheletro... op. cit.*, p. 14.

81 Per approfondimenti: J. Heyman, *Lo scheletro... op. cit.*, Capitolo 1; J. Heyman, *The science... op. cit.*; E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, Capitolo 10; A. Giuffrè, *La meccanica... op. cit.*, Capitolo 6; M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, Capitolo 3; S. Huerta, *Mechanics of masonry... op. cit.*

necessità di imporre ulteriori condizioni, che vadano «in aiuto» alle insufficienti equazioni di equilibrio.⁷⁶

Per questo motivo, la prima metà dell'ottocento risulta essere il «periodo cerniera» tra la statica «tradizionale» e l'avvento della teoria dell'elasticità. *“L'aspetto essenziale che rende innovativa l'impostazione di Navier rispetto ai trattati del secolo precedente consiste nel fatto che egli abbandona i metodi fondati sul «calcolo a rottura» [...] per addentrarsi nello studio delle strutture elastiche, tenendo cioè presente il reale stato di esercizio che generalmente rientra nel dominio dell'elasticità”*⁷⁷. Le nuove teorie elastiche, introdotte da Navier⁷⁸ e sviluppate da Cauchy che formulò l'odierno concetto di *tensione*, fecero irruzione nella scena della meccanica dei solidi muovendo le prime mosse dalle analisi delle nuove costruzioni in acciaio. Esse vennero presto estese anche al campo delle strutture murarie, nel tentativo di rispondere ai quesiti che la teoria del XVIII non era riuscita a risolvere. Il comportamento degli archi murari venne, quindi, ricondotto a quello di travi elastiche curve. Individuando cosa *“poteva essere tralasciato per arrivare a soluzioni valide, sebbene non assolutamente rigorose, [...] operando accorgimenti intuitivi ed efficaci da risolvere”*⁷⁹, Navier sviluppò una teoria che consentì, ingannevolmente, di definire il preciso stato di sollecitazione della struttura, identificandone, in maniera univoca, la posizione della curva delle pressioni interna e le reazioni ai vincoli: lo *“stato «reale» della struttura”*^{80, 81}

Il modello elastico dominò il XIX secolo; se ne occuparono Castigliano⁸², che applicò la teoria per studiare il Ponte Mosca sulla Dora Riparia di Torino (fig. 1.22), e Winkler⁸³ che, sfruttando il principio della minima energia di Menabrea⁸⁴ (“*in una struttura iperstatica, soggetta ad un assegnato sistema di forze, le effettive reazioni esplicate dai vincoli iperstatici sono tali da rendere minima l’energia di deformazione*”⁸⁵), affermò che “*la vera curva di pressione è quella che mediamente si discosta il meno possibile dalla linea d’asse dell’arco*”⁸⁶ (fig. 1.23).

1.2.V L’Analisi Limite

“*Anche in questo caso [...], si deve riconoscere che lo stato «reale» della struttura è effimero: esso potrebbe in teoria essere determinato se fossero esattamente note tutte le condizioni che influiscono sulla soluzione, ma una forte tempesta, un debole tremore del suolo, o un cambiamento nella linea di falda produrranno un piccolo cambiamento nel modo in cui la struttura si appoggia sulle sue fondazioni, e ciò produrrà uno stato di equilibrio integralmente differente per la struttura*”⁸⁷; Heyman si oppose fortemente all’applicazione della soluzione elastica alle strutture murarie, evidenziandone lo scollamento rispetto alla realtà: secondo la teoria ottocentesca, la stabilità dell’arco sarebbe dovuta essere estremamente sensibile a minime sollecitazioni ma, osservando il reale comportamento delle strutture, si può facilmente giungere alla conclusione che solo importanti movimenti portano al raggiungimento

82 C. Castigliano, *Théorie de l’équilibre des systèmes élastiques et ses applications*, Augusto Federico Negro, Torino, 1879 in M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*

83 E. Winkler, *Die Lehre von der Elasticitat und Festigkeit*, Praga, 1867 in E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*

84 Per approfondimenti: E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, Capitolo 17.

85 M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, p. 221.

86 A. Giuffrè, *La meccanica... op. cit.*, p. 226.

87 J. Heyman, *Lo scheletro... op. cit.*, p. 14.

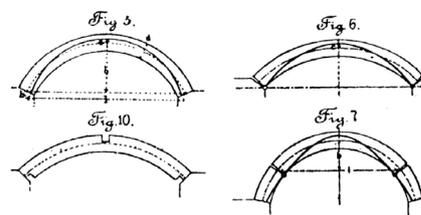


Fig. 1.23, Per evitare che la curva di pressione «calcolata» si discostasse troppo da quella «reale» dopo la rimozione delle centine, Winkler suggerì di imporre il passaggio della funicolare mediante l’inserimento di cerniere interne durante la stessa costruzione dell’arco. S. Huerta, *Mechanics of masonry... op. cit.*, p. 52.

ÉTUDE DU PONT EN PIERRE DE TAILLE
construit sur la Doire à Turin, par l'ingénieur Charles Mosca.

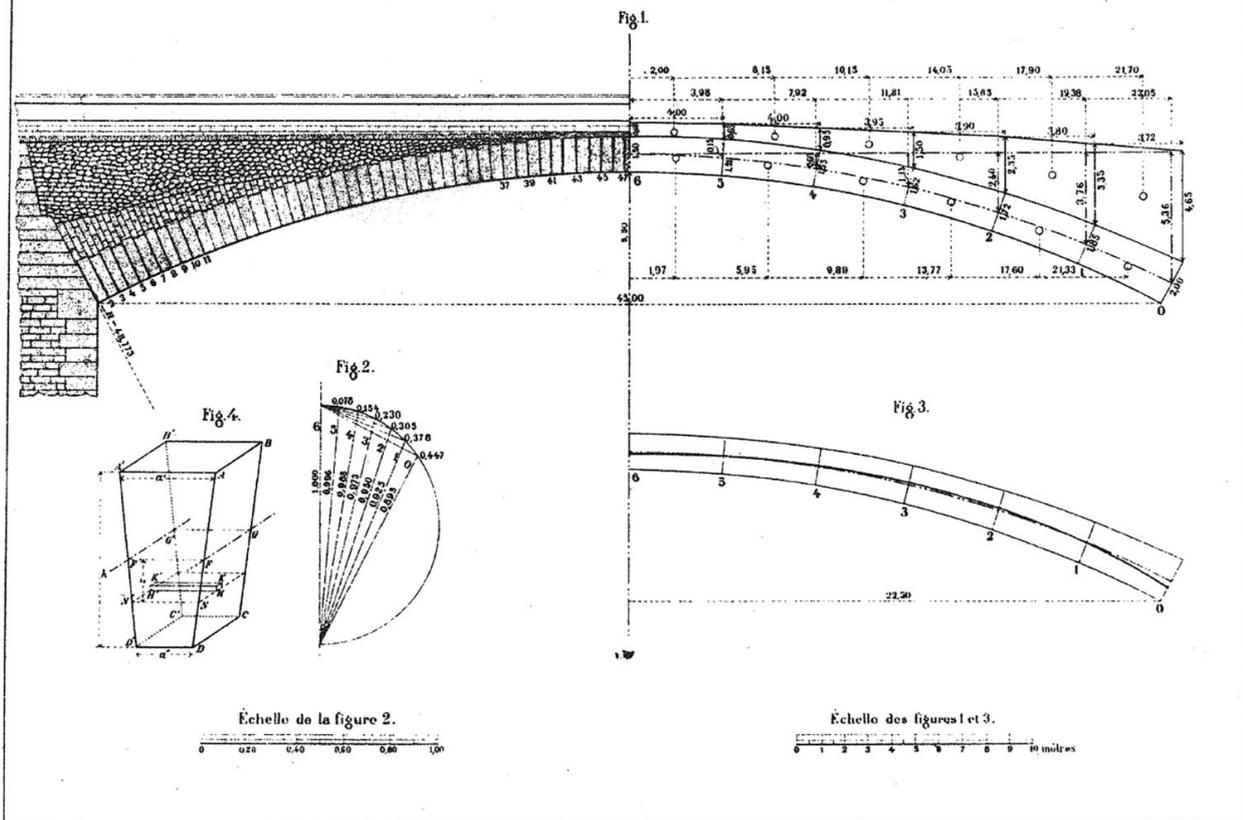


Fig. 1.22, Analisi del Ponte Mosca di Torino da parte di Castigliano. J. Heyman, *The safety of masonry arches*, Pergamon Press, 1969, p. 380.

dello stato di collasso. Sistematizzando riflessioni già avanzate da altri studiosi⁸⁸, Heyman applica la teoria della plasticità, inizialmente sviluppata per analizzare le strutture metalliche, alle costruzioni murarie: la costrizione del comportamento statico di tali strutture entro il limitante modello elastico risultava ormai obsoleta. *“Se due strutture apparentemente identiche ma in realtà con piccole imperfezioni diverse, cosicché esse siano in stati differenti di sforzo iniziale, sono lentamente caricate sino al collasso, allora i carichi di collasso e quindi la resistenza delle strutture, si troveranno identici”*⁸⁹; l’inutilità dello studio volto alla precisa definizione dello stato di sollecitazione della struttura viene più volte ribadita nell’introduzione del principale scritto di Heyman, il cui tema cardine è la disamina della teoria dell’Analisi Limite, che sviluppa una nuova linea di ricerca, recuperando gli studi sulla statica e la cinematica dell’arco del XVII e XVIII secolo.

La descrizione del funzionamento statico dell’arco viene condotta da Heyman in maniera chiara e diretta. La prima ipotesi che viene avanzata per analizzare il comportamento dell’arco è il cedimento delle imposte che induce la fessurazione dell’arco e la conseguente formazione di tre cerniere, punti di contatto attorno ai quali le porzioni dell’arco ruotano e in cui il passaggio della linea di spinta è obbligato. Tali lesioni, specifica Heyman, sono considerabili come *inevitabili e naturali*, testimoniando semplicemente *“qualche imprevedibile ed irresistibile cambiamento nell’ambiente esterno al quale la struttura ha*

88 In J. Heyman, *The safety... op. cit.*, l’autore pone le sue teorie in continuità con le prime intuizioni di Kooharian e Drucker.

89 J. Heyman, *Lo scheletro... op. cit.*, p. 15.

90 *Idem*, p. 20.

91 *Idem*, p. 22.

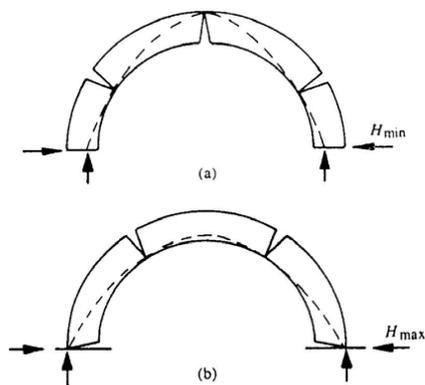


Fig. 1.24, "L'arco semicircolare sotto l'azione del suo peso proprio": (a) minima spinta sugli appoggi esercitata quando l'arco agisce sull'ambiente circostante; (b) massima spinta sugli appoggi esercitata quando l'ambiente circostante agisce sull'arco. J. Heyman, *Lo scheletro...* op. cit., p. 21.

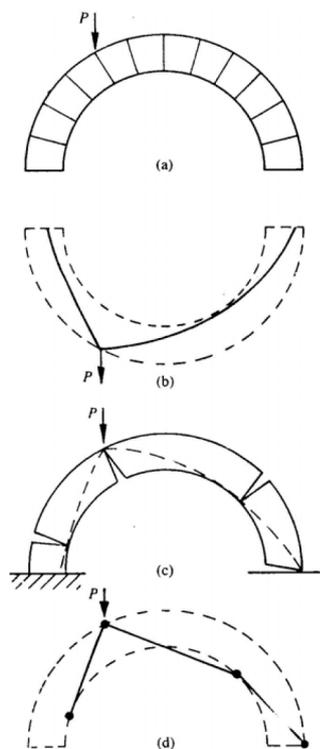


Fig. 1.25, "Collasso di un arco semicircolare soggetto a carico concentrato". J. Heyman, *Lo scheletro...* op. cit., p. 23.

*risposto*⁹⁰; la struttura a tre cerniere così definita è ben nota e staticamente determinata, sia nel caso della massima che della minima spinta (fig. 1.24). Le modalità di collasso vengono analizzate ipotizzando un peso concentrato agente sulla struttura, che determina lo spostamento della linea di spinta, "che si adatterà via via meno agevolmente all'interno dell'arco"⁹¹, fino al raggiungimento della formazione di un meccanismo di collasso a quattro cerniere (fig. 1.25): la crisi sopraggiunge quando la linea di spinta fuoriesce dalla sezione dell'arco. L'analisi condotta consente, inoltre, di formulare l'espressione che definisce il fattore di sicurezza geometrico, che per Heyman "sostituisce [...] l'idea convenzionale di un fattore di resistenza nella progettazione di costruzioni normali"⁹², ottenuto mediante il rapporto tra lo spessore dell'arco «reale» e quello caratterizzato dal minimo spessore che ne possa garantire la stabilità al peso proprio⁹³. Heyman basa le sue considerazioni sulla catena inversa di Hooke, enunciando che "il teorema statico dell'analisi limite afferma che se si può trovare una tale posizione [all'interno della sezione] per la linea di spinta, allora questa è una prova assoluta che la struttura è stabile, e che il collasso non potrà in effetti mai avvenire in corrispondenza al carico dato"⁹⁴.

L'importanza dei caratteri geometrici nelle strutture murarie viene ripetutamente stressato da Heyman e, per concludere la sintetica disamina dell'evoluzione dell'analisi del comportamento statico dell'arco, può essere per questo significativo accostare le parole

di Heyman a quelle di Rondelet, che affermano rispettivamente: “*la stabilità della struttura sarà assicurata principalmente dalla sua forma e in nessun modo (o solo molto marginalmente) dalla resistenza del materiale costituente*”⁹⁵ e “*non bisogna perdere di vista che piuttosto la stabilità che la forza costituisce la solidità degli edifici*”⁹⁶, dimostrando una linea di continuità tra le teorie settecentesche e moderne.

1.3 Cupole e volte

1.3.1 Sviluppi storici

La volta è la prima struttura ad asse curvilineo realizzata: i primi esempi, risalenti al IV e III secolo a.C., consistono in strutture a botte con tessitura a corsi inclinati, realizzate negli antichi territori mesopotamici e del Basso Egitto (fig. 1.26). Anche la configurazione a cupola ha origini arcaiche: realizzate dal IV secolo a.C. in argilla con funzione di copertura di abitazioni primitive, dal 1500 a.C. comincia ad essere impiegata la struttura muraria, prodotto della civiltà micenea. Le prime costruzioni prevedevano, analogamente ai primi archi, la posa di corsi lapidei orizzontali, progressivamente aggettanti; gli esempi pervenuti riguardano le tombe a *tholos*, di cui, tra i più evoluti, vi sono gli esempi micenei⁹⁷. Anche in questo caso, la sistematizzazione della realizzazione di volte come coperture di grandi spazi si ha in epoca romana; la tecnica maggiormente diffusa prevedeva la costruzione di volte in concrezione in *opus caementicium*, dotate di nervature laterizie; il primato

92 *Idem*, p. 26.

93 In particolare, Heyman suggerisce di impiegare un fattore di sicurezza vicino a 2 per garantire la stabilità con margine di sicurezza, considerando che lo spessore minimo di un arco stabile equivale a circa il 10% del raggio di curvatura dell'arco stesso.

94 J. Heyman, *Lo scheletro... op. cit.*, p. 26.

95 *Idem*, p. 29.

96 J. B. Rondelet, *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*, Parigi, 1802 in C. Carocci, C. Tocci (a cura di), *Antonino Giuffrè, Leggendo... op. cit.*, p. 167.

97 Analogamente ai *falsi archi*, anche tali strutture a corsi orizzontali vengono dette *false cupole*.

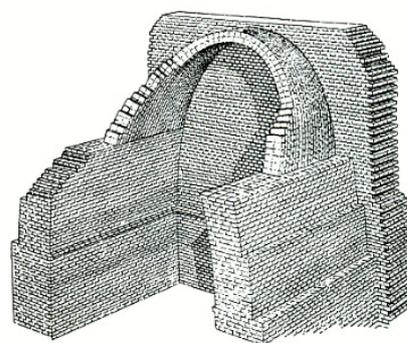


Fig. 1.26, Configurazione delle volte a botte mesopotamiche a corsi inclinati. M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, p. 266.

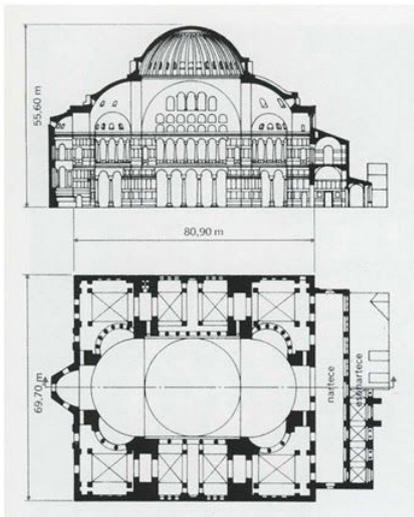


Fig.1. 27, Sezione longitudinale e planimetria di Santa Sofia. F. Ottoni, *Delle cupole...* op. cit., pp. 119, 98.

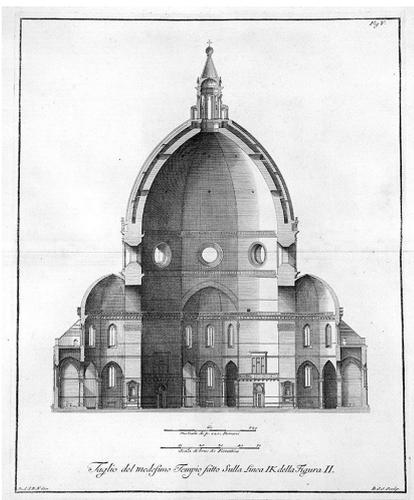


Fig.1. 28, Sezione di Santa Maria del Fiore passante per la mezzera della cupola. L. Ippolito, C. Peroni, *La cupola di Santa Maria del Fiore*, «Monumenti dell'architettura», collana diretta da C. Conforti, La Nuova Italia Scientifica, Roma, 1997, p. 60.

incontrastato tra le cupole così realizzate è del Pantheon. In epoche successive vennero sviluppate nuove tecniche finalizzate a ridurre il peso della struttura, come l'utilizzo di tubi fittili, tubi cavi laterizi, di cui un esempio è la cupola di San Vitale a Ravenna, risalente al V secolo. La tradizionale tecnica laterizia cominciò a diffondersi durante l'epoca bizantina e l'imponente cupola della chiesa di Santa Sofia di Costantinopoli, risalente al VI secolo, ne è il più ingegnoso esempio: caratterizzata da semicupole e archi che ne assorbono le spinte, la cupola definisce un ampio spazio suggestivo (fig. 1.27). Il medioevo è il periodo di maggiore sviluppo per la configurazione a crociera: inizialmente legato alle difficoltà economiche proprie di quel periodo, l'impiego di tale struttura divenne presto fortemente caratteristico del linguaggio gotico, proprio delle grandi cattedrali francesi. Dal XV secolo si assiste alla riscoperta dell'architettura classica romana accompagnata da floridi studi e numerose realizzazioni di cupole e volte a padiglione e vela. I successivi sviluppi tecnici relativi alla costruzione di sistemi voltati si intrecciano inevitabilmente con gli aspetti simbolici propri delle cupole. Le cupole di Santa Maria del Fiore e San Pietro, oltre a presentare ardite soluzioni tecniche, sono intrise di una forte carica simbolica, che le rende dei veri e propri landmark territoriali e culturali (fig. 1.28). Dalle sperimentazioni barocche con impianti ellittici e nuove singolari geometrie, come gli archi intrecciati di Guarini, si arriva a nuovi valori illuministici di cui le cupole si fanno portatrici: la laicità e la sperimentazione tecnica prevalgono

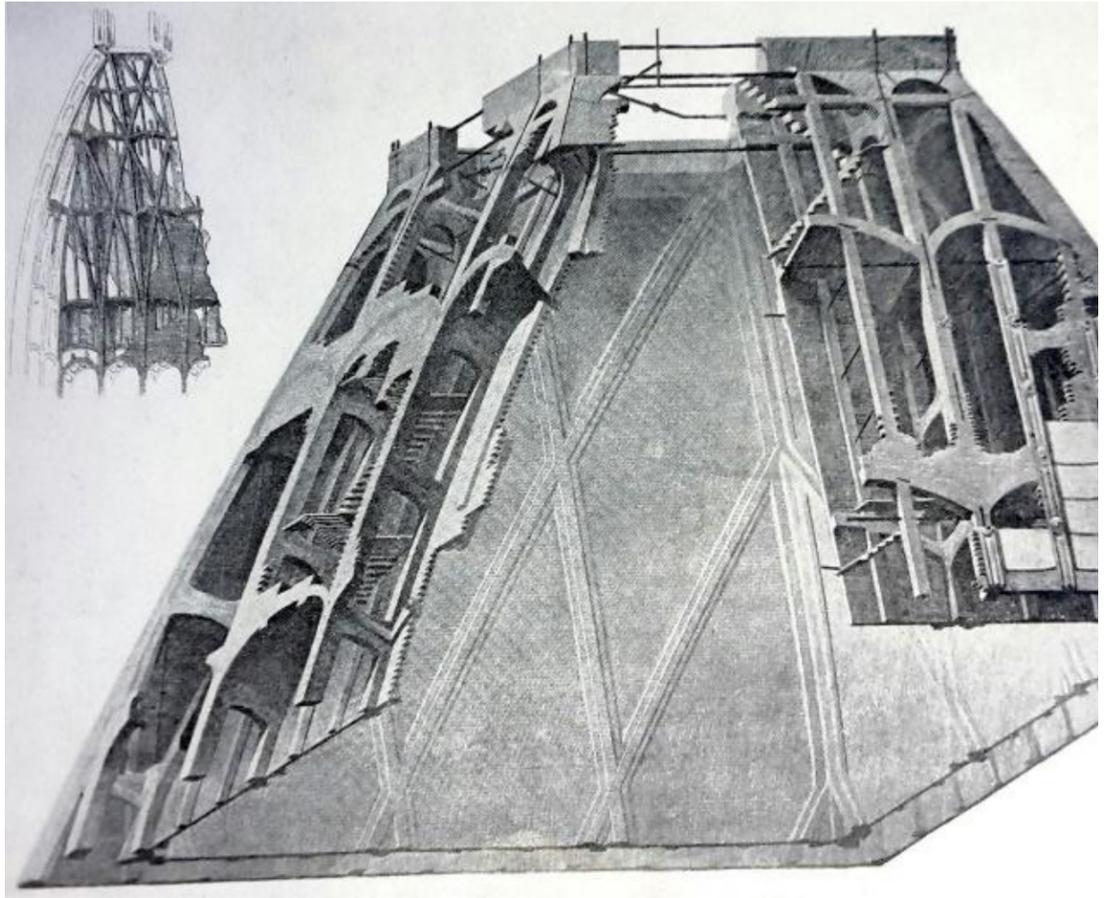


Fig. 1.29, Struttura della Mole antonelliana. E. Benvenuto, *La scienza delle... op. cit.*, p. 414.

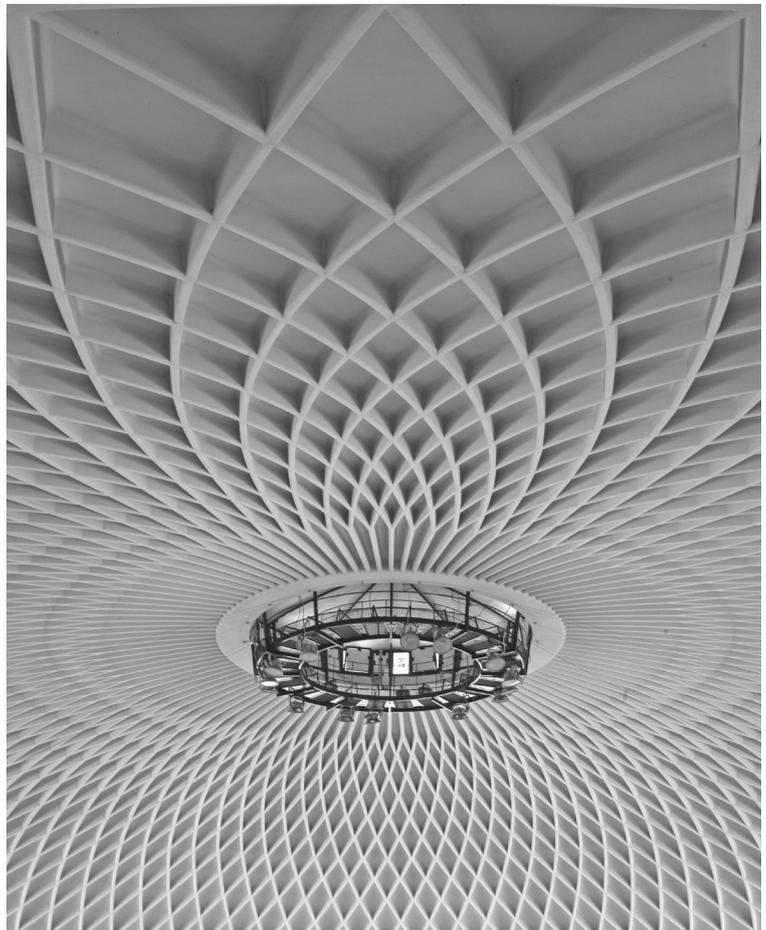


Fig. 1.30, Palazzetto dello sport di Nervi, Roma. <https://archidiap.com/opera/palazzetto-dello-sport/>.

98 Per approfondimenti: E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, Capitolo 10; M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, Capitolo 3; F. Ottoni, *Delle cupole... op. cit.*, Capitolo 7.

99 P. Bouguer, *Sur les lignes courbes qui sont propres à former les voûtes en dôme*, 1734 in E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*.

100 "Molti autori hanno studiato con gran cura le volte ad arco semplice [...] e tra di essi occorre citare con distinzione quelli [gli studi] del Signor Couplet. Non restano che le cupole, che nessuno, a quando io so, ha esaminato". Idem in E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, p. 339.

101 C. Bossut, *Recherches sur l'équilibre des voûtes*, Mémoires de l'Académie, 1778 e *Nouvelles recherches sur l'équilibre des voûtes en dôme*, Mémoires de l'Académie, 1779 in E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*.

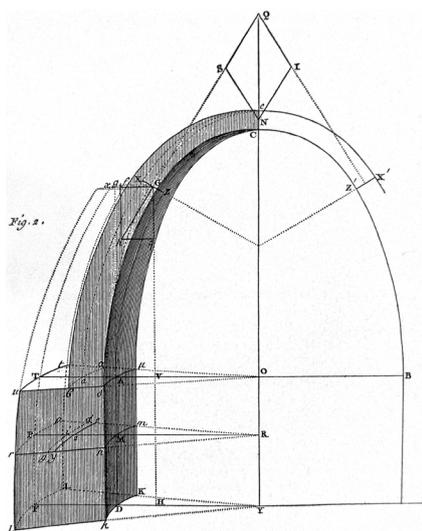


Fig. 1.31, Analisi dell'abate Bossut di un'«unghia» di cupola con spessore variabile indipendente dalle altre. E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, p. 349.

sull'originaria intenzionalità religiosa; così Saint Paul, Sainte Geneviève e, infine, le sveltanti realizzazioni antonelliane rappresentano gli ultimi grandi esempi di una cultura sviluppatasi per secoli, le cui nuove conquiste tecnologiche si rendono protagoniste di queste ardite realizzazioni (fig. 1.29). Le caratteristiche dei nuovi e moderni materiali determinano un radicale mutamento delle modalità di realizzazione di tali strutture, pur conservandone in alcuni virtuosi casi, come le opere di Nervi, l'insegnamento (fig. 1.30).⁹⁸

1.3.II Evoluzione dell'analisi statica

L'analisi statica dei sistemi voltati procede parallelamente agli studi prima citati riguardanti gli archi; dal XVIII secolo i maggiori studiosi conducono le due ricerche insieme: sia le volte che le cupole sono, infatti, da sempre analizzate come insiemi di archi, trascurando la natura intrinsecamente spaziale di tali sistemi. Couplet, Coulomb, Frézier e Mascheroni avevano dedicato i loro trattati all'analisi di sistemi voltati; ma il primo studioso che dedicò una memoria⁹⁹ esplicitamente al tema delle cupole fu Bouguer, il quale, elogiando i precedenti studi relativi alla stabilità degli archi¹⁰⁰, estese tali teorie agli elementi spaziali, introducendo la possibilità di analizzare la stabilità delle cupole intese come fascio di archi indipendenti fra loro. L'abate Bossut¹⁰¹ si pone in continuità con le considerazioni di Bouguer, analizzando lo spessore variabile degli archi indipendenti che compongono le cupole (fig. 1.31). La prima applicazione di tale teoria si ha con la verifica

della stabilità della cupola di San Pietro, la cui vicenda vede il confronto tra illustri personaggi: Boscovich, Le Seur, Jacquier e Poleni. I *tre matematici*, nelle loro celebri relazioni¹⁰² riguardanti le condizioni statiche della cupola, conducono un'analisi sistematica della fabbrica comprensiva dello stato del danno, delle cause dello stesso e, quindi, degli interventi necessari. Dal meticoloso studio, che si distingue per l'attenzione all'*oggetto*¹⁰³, grazie all'applicazione del principio dei lavori virtuali, risulta che il meccanismo cinematico che ha interessato la cupola è proprio quello indagato dalle teorie contemporanee: la suddivisione della struttura in «spicchi» a causa della «*gagliarda*» spinta¹⁰⁴ della stessa; la soluzione consigliata è, quindi, l'inserimento di cerchiature metalliche all'imposta della cupola. Per una serie di vicissitudini storiche¹⁰⁵, il progetto viene poi affidato a Poleni¹⁰⁶ che, grazie all'accurato rilievo geometrico e del danno elaborato da Vanvitelli (fig. 1.32), arriva alle medesime conclusioni dei tre matematici e, quindi, allo stesso intervento da eseguire. Entrambe le ricerche analizzano, quindi, il comportamento statico della cupola approssimando la struttura a una serie di archi indipendenti tra loro, la cui stabilità era facilmente indagabile tramite l'analisi della catenaria (fig. 1.33) e si riconosce ai tre matematici il merito di aver introdotto il tema dell'interazione circonferenziale propria del meccanismo della struttura a cupola. Molti sono gli studi che riprendono la teoria, quali ancora quelli di Kobell e Beckett della seconda metà dell'ottocento¹⁰⁷, i cui principi rimangono immutati nel corso dei secoli, come testimoniato

102 F. Jacquier, T. Le Seur, R. G. Boscovich, *Parere di tre matematici sopra i danni che si trovano nella cupola di S. Pietro*, Palliarini, Roma, 1742 e *Riflessioni de padri Tommaso Le Seur, Francesco Jacquier dell'Ordine de' Minimi, e Ruggiero Giuseppe Boscovich della Compagnia di Gesù, sopra alcune difficoltà spettanti i danni, e risarcimenti della Cupola di S. Pietro*, Roma, 1743 in D. Capecchi, C. Tocci, *Le perizie sulla cupola vaticana di Le Seur, Jacquier e Boscovich*, «Palladio», 47, 2011, pp. 43-58.

103 «Dove sieno le aperture, l'abbiamo ricavato dal Fatto». *Idem* in D. Capecchi, C. Tocci, *Le perizie... op. cit.*, p. 46.

104 D. Capecchi, C. Tocci, *Le perizie... op. cit.*, p. 44.

105 Per approfondimenti: D. Capecchi, C. Tocci, *Le perizie... op. cit.*; D. Capecchi (a cura di), *Perizie di Statica*, «Edizione Nazionale delle Opere e delle Corrispondenze di Ruggiero Giuseppe Boscovich», Volume IX/II, Opere scientifiche Meccanica (statica e dinamica), Roma-Milano, 2010.

Nella pagina successiva: Fig. 1.32, «Rilievo dello spaccato della cupola di San Pietro» ad opera del Vanvitelli. <https://catalogo.beniculturali.it/detail/HistoricOrArtisticProperty/1500052388>

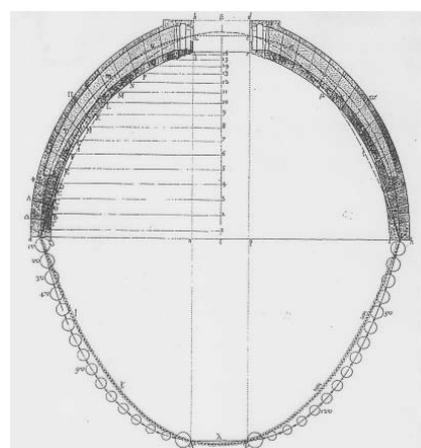
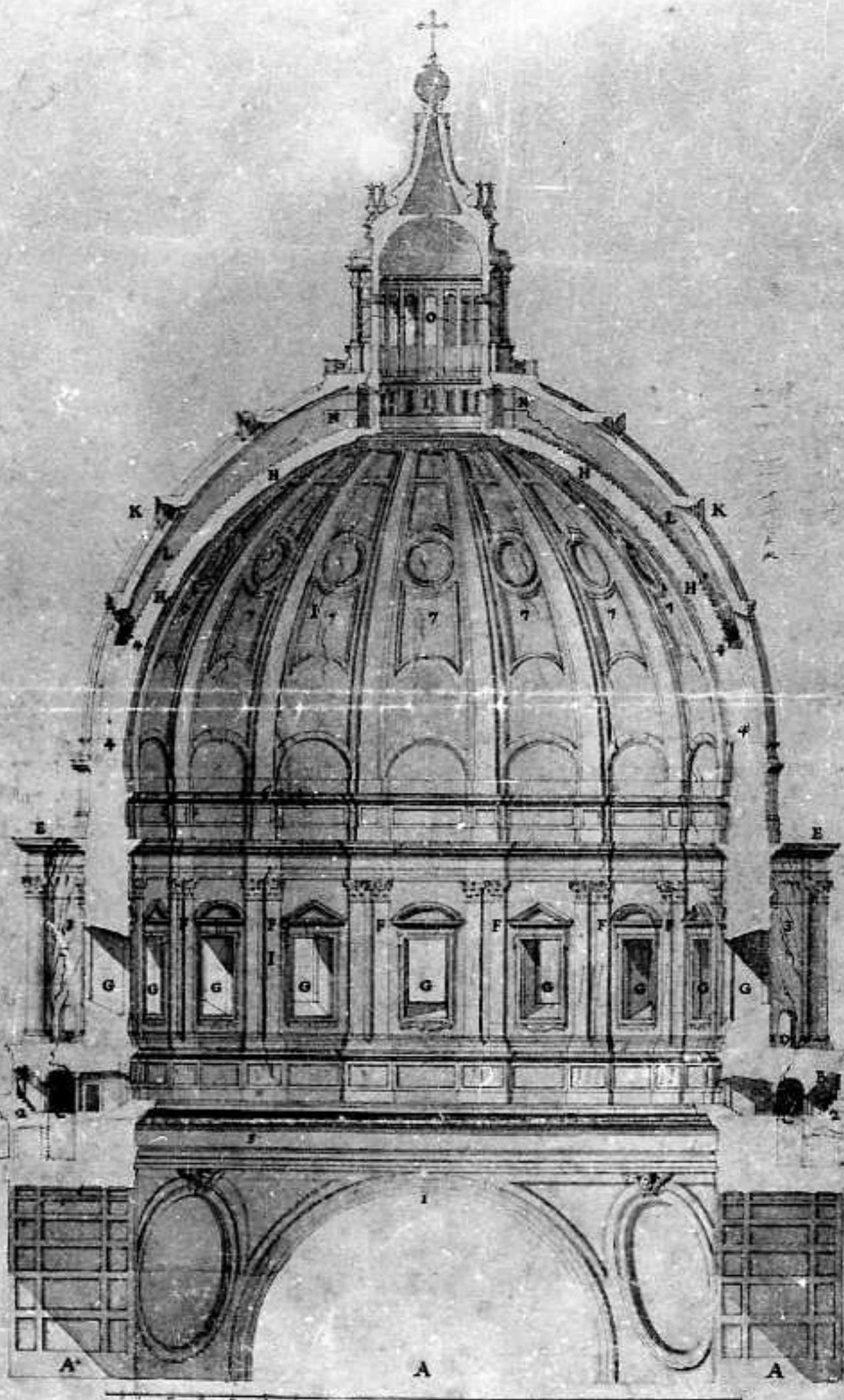


Fig. 1.33, Analisi della catenaria dei singoli archi svolta da Poleni. J. Heyman, *Lo scheletro... op. cit.*, p. 42.

Spaccato della Cuppola.



anche dagli studi di Gaudì (fig. 1.34) sulla geometria delle sue architetture mediante l'utilizzo di maquette «pendenti», fino alla formulazione dell'Analisi Limite di Heyman, che ne dà un'ulteriore conferma.¹⁰⁸

1.3.III Gusci sferici: cupola

Heyman definisce la cupola come una “*volta arrotondata*”¹⁰⁹ che può assumere forme differenti, di cui la più comune è quella di un guscio di rivoluzione: caratterizzato da sezioni orizzontali circolari, questo viene inteso come un “*elemento strutturale a doppia curvatura positiva*”¹¹⁰, il cui spessore è trascurabile se confrontato alle dimensioni della struttura. Per analizzare il comportamento strutturale di tali geometrie, si utilizza il modello della membrana, ossia “*una superficie di spessore sottile priva di rigidità flessionale e torsionale, soggetta in ogni suo punto a sollecitazioni appartenenti al piano tangente in quel punto alla superficie*”¹¹¹; da questo deriva la denominazione della teoria dell'Analisi Limite nell'ambito dei sistemi voltati: la *teoria membranale*¹¹².

Per indagare il comportamento statico della cupola, Heyman utilizza un guscio semisferico, che non presenta rigidità flessionale: le azioni interne che si sviluppano nel guscio sono, quindi, per una condizione di carico assialsimmetrica, come quella di peso proprio, esclusivamente di trazione e compressione. In particolare, le pressioni applicate nella direzione dell'asse di rivoluzione vengono trasmesse con continuità tra gli elementi costituenti

106 G. Poleni, *Memorie storiche della gran cupola del Tempio Vaticano e de' danni di essa, e de' ristoramenti loro, divise in libri cinque*, Stamperia del Seminario, Padova, 1748 in D. Capecchi, C. Tocci, *Le perizie... op. cit.*

107 S. Huerta, *Mechanics of masonry... op. cit.*

108 Per approfondimenti: E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, Capitolo 9; J. Heyman, *Lo scheletro... op. cit.*, Capitolo 3; J. Heyman, *The safety... op. cit.*; S. Huerta, *Mechanics of masonry... op. cit.*

109 J. Heyman, *Lo scheletro... op. cit.*, p. 31.

110 M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, p. 275.

111 E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, p. 605.

112 J. Heyman, *Lo scheletro... op. cit.*, p. 32. Tale modello era già in uso dal XIX secolo. Per approfondimenti: E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, Capitolo 14.



Fig. 1.34. Le maquette sono oggi esposte con uno specchio sottostante, consentendo la visione sia del modello «pendente» che della forma geometrica. Foto dell'autore, 2019.

113 Considerando il guscio rappresentato in fig. 1.35, per calcolare lo sforzo di compressione agente sul perimetro di imposta ($2\pi a t$) è sufficiente eguagliarlo al peso totale della struttura ($\rho(2\pi a^2 t)$) ottenendo così come risultato che $\sigma = \rho a$: lo sforzo dipende, quindi, dal peso per unità di volume della struttura e il suo raggio. *Idem*, p. 34.

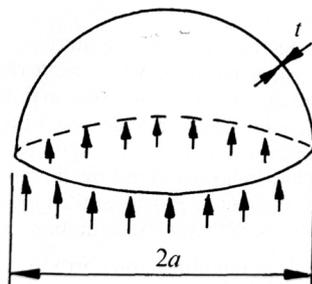


Fig. 1.35, Guscio semisferico soggetto al peso proprio. J. Heyman, *Lo scheletro...* op. cit., p. 33.

114 *Idem*, p. 32.

115 C. Carocci, C. Tocci, *Ricostruzione della lanterna di S. Mattia ai Crociferi a Palermo*.

116 In particolare, gli sforzi circonferenziali sono di compressione “dal vertice fino alla colatitudine di $51,82^\circ$, e quindi diventa di trazione, aumentando rapidamente il suo valore verso il basso”. J. Heyman, *Lo scheletro...* op. cit., p. 37.

117 F. Jacquier, T. Le Seur, R. G. Boscovich, *Parere di tre matematici sopra i danni che si trovano nella cupola di S. Pietro*, Pallearini, Roma, 1742 in D. Capecchi (a cura di), *Perizie di Statica...* op. cit., p. 101.

la struttura. È possibile dimostrare che lo sforzo di compressione all’imposta del guscio è indipendente dallo spessore¹¹³, motivo per il quale le cupole sono strutture leggere. “*Il comportamento di una membrana flessibile appesa, fatta ad esempio in tela, è marcatamente differente da quello della catena flessibile*”¹¹⁴; lo stato di sollecitazione della struttura soggetta a carichi assialsimmetrici “è caratterizzato dalla coesistenza del comportamento ad arco che si instaura negli spicchi [...] individuati da due meridiani vicini e dell’effetto di contenimento che si esplica lungo le sezioni orizzontali definite dagli anelli paralleli. Lo scambio di sollecitazioni interne tra gli anelli paralleli e gli archi meridiani consente alla cupola di diventare [...] superficie funicolare di qualunque condizione di carico distribuito. Così, a differenza dell’arco la cui stabilità richiede una perfetta congruenza tra la sua forma e la funicolare dei carichi, la stabilità di una cupola è comunque garantita dall’intervento degli sforzi secondo i paralleli. Questi equilibrano una componente radiale dei carichi assegnati tale da rendere gli archi meridiani curve funicolari del carico residuo”¹¹⁵. La chiara definizione data sottolinea l’importanza della funzione statica dei paralleli che, a differenza dei meridiani, soggetti unicamente a sforzi di compressione, svolgono un ruolo di contenimento in prossimità dell’imposta¹¹⁶: sono soggetti a trazione (“*il che non poteva accadere senza aprirsi a modo di mela granata di sopra in sotto*”¹¹⁷) (fig. 1.36); è così facilmente giustificabile il comportamento della struttura osservato fino dal XVIII secolo: gli sforzi di trazione, inammissibili per la struttura muraria,

determinano delle fessurazioni perpendicolari alla direzione delle tensioni, sviluppandosi, quindi, lungo i meridiani (fig. 1.37). La condizione di equilibrio della struttura, divisa in spicchi assimilabili ad archi, intesi come indipendenti, può, quindi, essere indagata tramite la valutazione della spinta esercitata sul piano di imposta e l'analisi statica delle strutture di sostegno, come correttamente intuito dai tre matematici e Poleni.¹¹⁸

1.3.IV Gusci cilindrici: volta a botte, a crociera e a padiglione

Oltre la volta a botte, il cui modello è assimilabile a un guscio cilindrico, generata quindi *“dalla traslazione di un arco lungo una direttrice ad esso ortogonale”*¹¹⁹ anche le volte a crociera e a padiglione possono essere comprese all'interno della stessa categoria, in quanto composte dall'intersezione delle medesime strutture. Dal punto di vista statico, tali sistemi voltati sono accomunati da una peculiarità: *“a differenza dei gusci sferici, le volte cilindriche non possono, per loro natura, esplicare resistenza di forma”*¹²⁰, a causa dell'assenza di curvatura in una direzione della struttura. Come sottolineato da Giuffrè¹²¹, è interessante evidenziare come, analogamente al linguaggio di oggetti, che consentiva agli intellettuali illuministi di analizzare il comportamento statico delle strutture riconducendole a macchine elementari, anche nello studio dei sistemi voltati si ricorre a questa logica: *“nella struttura più complessa si cerca di individuare la presenza ideale di strutture più semplici già note,*

118 Riferimenti per l'analisi della struttura a cupola: J. Heyman, *Lo scheletro... op. cit.*, Capitolo 3; E. Benvenuto, *La scienza... op. cit.*, Capitolo 9; M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, Capitolo 4; C. Carocci, C. Tocci, *Ricostruzione della lanterna... op. cit.*; D. Capecchi, C. Tocci, *Le perizie... op. cit.*; A. Giuffrè, *La meccanica... op. cit.*, Capitolo 6.

119 A. Giuffrè, *La meccanica... op. cit.*, p. 231.

120 M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, p. 392.

121 A. Giuffrè, *La meccanica... op. cit.*, Capitolo 6.

122 *Idem*, p. 231.

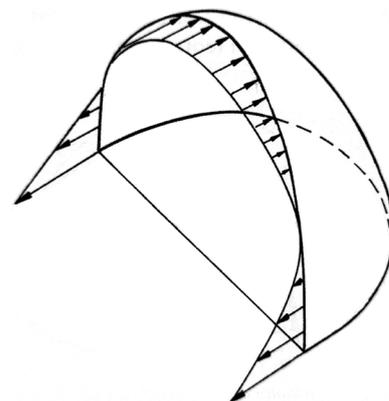


Fig. 1.36, “Risultante degli sforzi circolari necessari per l'equilibrio di un guscio sferico”. J. Heyman, *Lo scheletro... op. cit.*, p. 39.

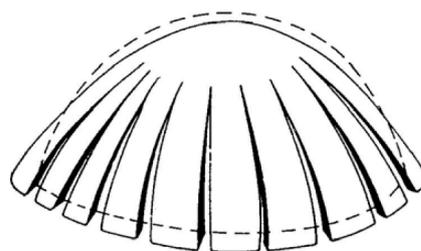


Fig. 1.37, “[...] fessurazione di una cupola dovuta ad un aumento di luce”. J. Heyman, *Lo scheletro... op. cit.*, p. 40.

124 L'analisi condotta in M. Como, *Statica delle costruzioni...* *op. cit.* per i vari sistemi voltati prende avvio dalla teoria membranale e, solo dopo una rigida dimostrazione analitica dell'insorgere di sforzi di trazione e della conseguente formazione delle lesioni, studia il comportamento statico delle strutture intese come successioni di archi.

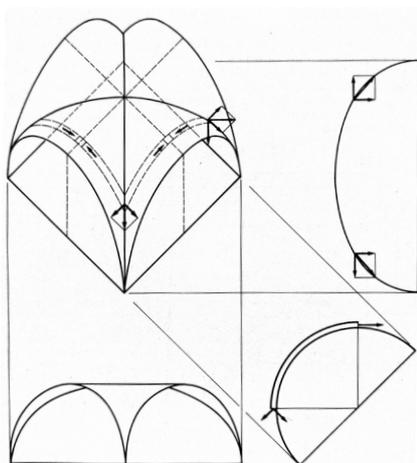


Fig. 1.38, Trasmissione degli sforzi in una volta a crociera. A. Giuffrè, *La meccanica...* *op. cit.*, p. 233.

*rimanendo sempre in un linguaggio di oggetti*¹²². Così la cupola e la volta a botte vengono rispettivamente analizzate come fasci propri e impropri di archi, la volta a crociera e a padiglione come l'intersezione di due volte a botte. Questa logica permane per lungo tempo negli studi dell'analisi strutturale e si assiste al suo superamento solo con lo sviluppo dell'analisi del continuo e il metodo degli elementi finiti, nonostante sia, ancora oggi, *“profondamente radicato nella mentalità corrente”*¹²³. La concisa disamina riportata successivamente, relativa al funzionamento meccanico e ai principali quadri fessurativi rilevabili nelle varie tipologie di sistemi voltati, segue l'analisi condotta da Heyman. Per una trattazione più estesa e sistematica, è possibile fare riferimento ai testi di Como¹²⁴.

Il funzionamento statico e, quindi, i meccanismi di danno della volta a botte possono essere facilmente ricondotti a quelli dell'arco semicircolare. Le lesioni che caratterizzano la formazione di cinematismi dovuti all'allontanamento delle imposte in tali strutture sono, quindi, le medesime rispetto a quelle precedentemente trattate: si osservano lesioni continue intradossali in chiave ed estradossali alle reni. Essendo intesa come successione di archi, la volta a botte esercita una spinta distribuita su tutta la lunghezza dei muri di sostegno.

Considerate le difficoltà legate alla stereotomia dei blocchi che costituiscono gli elementi diagonali, fin dai tempi dei romani, la costruzione delle volte a

crociera prende avvio da tali componenti. Le tecniche costruttive risultano coerenti con il funzionamento strutturale: “*i due archi diagonali costituiscono la struttura portante principale, che ha il compito di scaricare sui quattro piloni il peso totale; su di essi si appoggiano i quattro spicchi di volta a botte*”¹²⁵.

La successione di archi indipendenti che compone le unghie della crociera trasmette la spinta agli arconi diagonali, che introducono delle discontinuità geometriche e, di conseguenza, nel campo di forze: su tali elementi, agisce la combinazione di sforzi perpendicolari (fig. 1.38). Data l'intrinseca debolezza di tali componenti, è ricorrente l'impiego di strutture di rinforzo, i costoloni, che, oltre a ricoprire tale ruolo, assumono spesso una funzione estetica¹²⁶. Relativamente allo stato fessurativo osservabile in queste tipologie di volte, si citano gli studi di Abraham¹²⁷ che identificano tre tipi di lesioni ricorrenti (figg. 39, 40). La prima tipologia interessa la porzione in chiave, dove si verifica la formazione di una cerniera all'estradosso, con conseguente lesione visibile internamente. La seconda tipologia è osservabile nella porzione mediana dell'unghia della volta, parallelamente ai *formeret*¹²⁸ e alla lesione in chiave prima descritta: note come lesioni di Sabouret¹²⁹, sono considerabili come fessure data la loro considerevole ampiezza, tale da determinare un vero e proprio distacco dell'unghia dalla porzione in chiave. Infine, l'ultima tipologia di lesioni ricorrenti nelle volte a crociera identificate da Abraham si formano in adiacenza ai muri perimetrali, anch'essi paralleli alle prime due tipologie di lesioni.

125 A. Giuffrè, *La meccanica... op. cit.*, p. 231.

126 Come sottolineato da Heyman, la presenza dei costoloni non è essenziale per il mantenimento dello stato di equilibrio delle volte a crociera ma ne favorisce alcuni aspetti costruttivi, evitando l'impiego di centine e consentendo una maggiore facilità nella posa dei blocchi. Sono, inoltre, utili a celare le spigolature e vengono spesso impiegati anche come elementi puramente decorativi in volte a vela, come nel caso delle *liernes* e i *triercerons*. J. Heyman, *Lo scheletro... op. cit.*, p. 57.

127 P. Abraham, *Viollet-le-Duc et le rationalisme médiéval*, Parigi, 1934 in *Idem*.

128 Archi di bordo della volta a crociera. M. Como, *Stativa delle costruzioni... op. cit.*, p. 424.

129 Victor Sabouret, allora ingegnere capo di ponti e strade, fu il primo a contestare le teorie esposte da Viollet-le-Duc relative alla funzione strutturale dei costoloni delle volte a crociera, grazie alle conoscenze acquisite osservando i danni subiti dalle volte delle cattedrali gotiche, causati dai bombardamenti della prima guerra mondiale. V. Sabouret, *Les voûtes d'arête nervurées. Role simplement décoratif des nervures*, Le Génie Civil, 1928 in I. Tarrío, *Gothic Structural Theories ca. 1930: the Contribution of Victor Sabouret*, «Advanced Materials Research», 133-134, 2010, pp. 137-142.

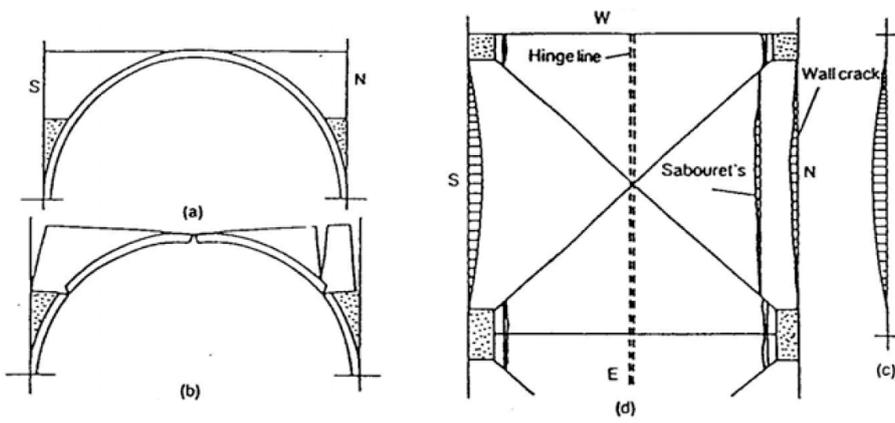
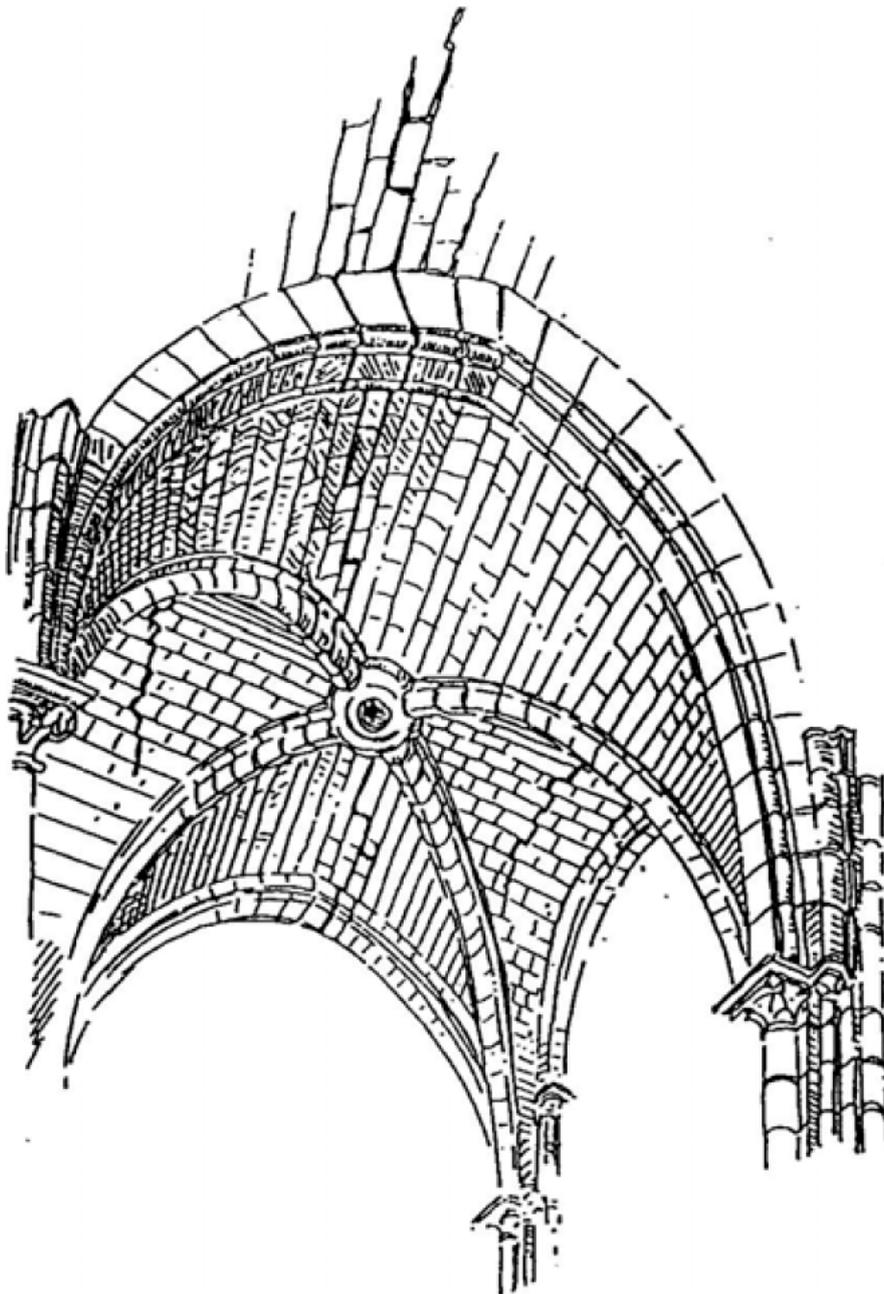


Fig. 1.40, Rappresentazione delle fessure in pianta e sezione. J. Heyman, *Lo scheletro... op. cit.*, p. 72.

Fig. 1.39, Fessure nelle volte gotiche osservate da Abraham. J. Heyman, *Lo scheletro... op. cit.*, p. 70.



In conclusione, analogamente a quanto descritto in precedenza, il comportamento statico delle unghie della volta a crociera viene analizzato immaginandole composte da un fascio di archi indipendenti fra loro. A differenza della volta a crociera, i cui appoggi si limitano a elementi puntuali posti negli spigoli, la volta a padiglione trasmette un carico continuo lungo i quattro sostegni perimetrali. I fusi sono, infatti, soggetti a un differente stato tensionale rispetto alle unghie precedentemente analizzate: ogni punto “*si trova a far parte sia di uno degli archi elementari di cui [il fuso] è costituito, sia della direttrice che raccoglie le spinte dei due archi [...] ad esso ortogonali*”¹³⁰ (fig. 1.41). Il fuso della volta è interessato dall’insorgere di sollecitazioni di trazione alla base dello stesso, che, analogamente a quanto accade nelle cupole, determina la formazione di lesioni che si sviluppano in direzione perpendicolare; rappresentando gli arconi diagonali, anche in questo caso, delle discontinuità geometriche, la concentrazione di sforzi e, di conseguenza, la formazione delle lesioni interessano tali elementi (fig. 42). Il comportamento statico della volta a padiglione si distingue, quindi, da quello della volta a crociera, e l’analisi statica dei fusi prevede di indagare anche la stabilità degli archi ad essi ortogonali.¹³¹

130 A. Giuffrè, *La meccanica... op. cit.*, p. 237.

131 Riferimenti per l’analisi dei sistemi voltati: J. Heyman, *Lo scheletro... op. cit.*, Capitolo 4; M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, Capitolo 4; A. Giuffrè, *La meccanica... op. cit.*, Capitolo 6.

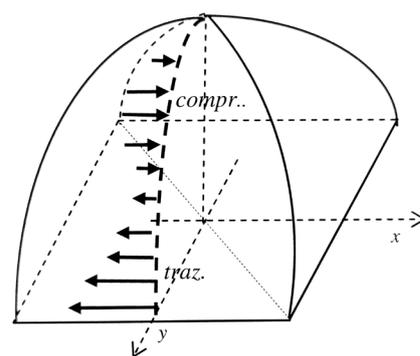


Fig. 1.41, Trasmissione degli sforzi in una volta a padiglione. A. Giuffrè, *La meccanica... op. cit.*, p. 236.

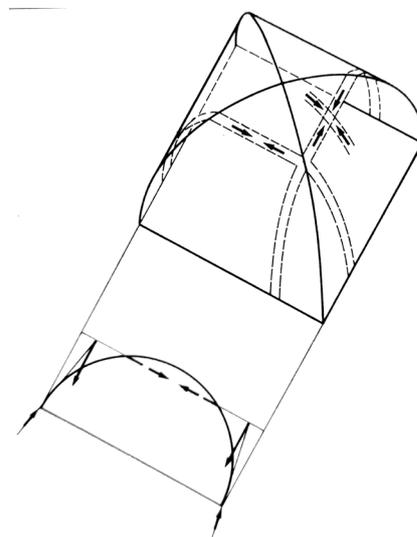


Fig. 1.42, Risultante degli sforzi nel fuso di una volta a padiglione. M. Como, *Statica delle costruzioni... op. cit.*, p. 479.



Il contesto costruito

L'Aquila, l'evoluzione della città sismica

2.1 Introduzione alla sismicità locale

2.2 Una nuova città

2.2.I *Fondazione*

2.2.II *Rifondazione*

2.3 I terremoti storici

2.3.I *3 dicembre 1351*

2.3.II *9 settembre 1349*

2.3.III *27 novembre 1461*

2.3.IV *2 febbraio 1703*

2.4 L'evoluzione delle tecniche costruttive

2.4.I *Il terremoto come «causa»: prime riflessioni e accorgimenti antisismici*

2.4.II *Il terremoto come «effetto»: lo sviluppo dei primi presidi antisismici*

2.5 I restauri moderni

2.5.I *Continuità (XIX secolo)*

2.5.II *Frattura (XX secolo)*

2.6 La chiesa come palinsesto costruttivo

Schede tematiche

- 1 Eventi sismici dall'anno 1900 nell'area nazionale
- 2 Eventi sismici dall'anno 1301 nell'area compresa entro 50 km da L'Aquila
- 3 Pirro Ligorio e il primo prototipo di *casa antisismica*
- 4 Le prime tecniche costruttive antisismiche
- 5 Il *baraccato aquilano*

Capitolo 2

2.1 Introduzione alla sismicità locale

1 F. Pasquarè Mariotto, *Prefazione* in M. Baratta, *I terremoti in Italia*, Ristampa anastatica, «Katastrophé», collana diretta da L. Mercalli, Volume I, Mimesis, Milano-Udine, 2020.

2 *Resilienza*, voce Enciclopedia online Treccani. <https://www.treccani.it/enciclopedia/resilienza/>, u.c. ottobre 2023.

Il territorio italiano è uno dei più geologicamente attivi al mondo, definito come “*un vero microcosmo di paesaggi derivanti dalla dinamica terrestre rappresentata dal movimento delle placche litosferiche*”¹. I frequenti, spesso violenti, eventi sismici che hanno costellato la storia del Paese non rappresentano solo avvenimenti di natura geodinamica e tettonica, che hanno inevitabilmente plasmato e continuamente modificato il territorio della penisola, ma hanno contribuito a forgiare la cultura, principalmente costruttiva ma non solo, dei popoli che per secoli hanno dovuto affrontare le conseguenze di tali eventi calamitosi. Il tema della resilienza, termine di cui oggi spesso si abusa, è radicato nella nostra cultura; “*la capacità di reagire a traumi e difficoltà, recuperando l'equilibrio [...] attraverso la mobilitazione delle risorse [...] e la riorganizzazione in chiave positiva [...]*”²: tanti sono gli impulsi dinamici che hanno portato a sviluppi in diversi campi, le cui origini prendono piede dal desiderio, o dalla necessità, di riscatto. Nel campo tecnico costruttivo, i terremoti hanno portato a importanti sviluppi tecnologici e metodologici, anche prima che la meccanica ne consentisse una trattazione scientifica e le risposte messe in campo procedevano «per tentativi», seguendo la logica dell'empirismo. Per questo motivo, il territorio italiano è costellato di antenati degli odierni presidi antisismici, più o meno complessi, la cui efficienza e affidabilità si sono progressivamente evolute nel corso dei secoli, consentendo di limitare l'entità dei danni al patrimonio

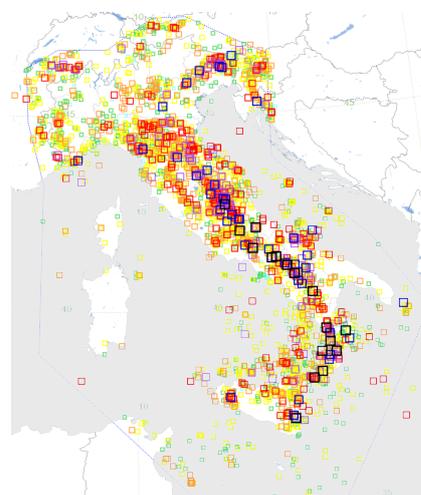
In copertina: B. Gozzoli, *Sogno di Innocenzo III*, dettaglio, XV secolo, Chiesa di San Francesco, Montefalco (PG). S. Mammana, R. Roggeri, *Cristoforo di Bindoccio, Meo di Pero e il ciclo francescano di Pienza. Rarità iconografiche e nuove scoperte*, «Canonica», Rivista di Studi Pientini, 8, Con tutte le vele, Pienza (SI), 2018, p. 18.

costruito e la perdita di vite umane.

La meccanica moderna consente di prevedere il comportamento sismico delle costruzioni, imponendo logiche più stringenti nel campo della progettazione. Anche nel campo della sismologia, da decenni ormai i geologi si adoperano per stimare località e possibile potenza distruttiva di un evento sismico futuro; gli odierni strumenti impiegati per il monitoraggio geofisico non sono però sufficienti per le complesse stime, in quanto i terremoti si manifestano su scale temporali geologiche; per questo si fa riferimento alla cosiddetta sismologia storica. Questa viene definita come *“una branca della sismologia che si occupa della ricostruzione degli effetti dei terremoti del passato avvenuti prima della comparsa degli strumenti di registrazione dei terremoti”*³. Gli effetti a cui si accenna sono frutto dell'analisi e della reinterpretazione della letteratura storica, costituita da fonti bibliografiche di diversa tipologia, che descrive le conseguenze del sisma sul territorio; tali analisi vengono svolte da storici e sismologi con l'obiettivo di tradurre le informazioni in dati sismologici. La disciplina si rivela, quindi, fondamentale per analizzare la natura sismica di una specifica località. Il fondatore della sismologia storica viene da molti identificato nella figura di Mario Baratta⁴, geografo italiano che ha dedicato gli ultimi anni dell'ottocento a costituire un ricco archivio sismologico italiano: una *“cronistoria documentata”*, come egli stesso la definisce, degli eventi sismici che hanno interessato il territorio italiano dall'anno 1 al 1900, riportati con un

3 F. Pezzella, *I terremoti del passato nei cataloghi storici e nelle banche dati, preziose fonti di informazioni*. <https://www.ingv.it/newsletter-ingv-n-8-ottobre-2021-anno-xv/i-terremoti-del-passato-nei-cataloghi-storici-e-nelle-banche-dati-preziose-fonti-di-informazioni>, u.c. ottobre 2023.

4 Nato a Voghera (PV) nel 1868, dal 1911 ha insegnato Geografia all'università di Pavia. Il suo maggiore interesse scientifico è stata l'analisi storica di fenomeni fisici; oltre alla pubblicazione riportata in nota 1, *La catastrofe sismica calabro-messinese*, Roma, 1917 viene considerata la sua maggiore opera. All'interesse geologico, Baratta associa quello geografico: ha approfondito vari temi ad esso connessi e dirige dal 1919 al 1929 la rivista «La geografia», edita dall'Istituto geografico De Agostini di Novara. Muore nel 1935 a Casteggio (PV). *Baratta, Mario*, voce Dizionario Biografico degli italiani Treccani, Volume 5 (1963). https://www.treccani.it/enciclopedia/mario-baratta_%28Dizionario-Biografico%29/, u.c. gennaio 2024.



Magnitudo momento dei terremoti indicati

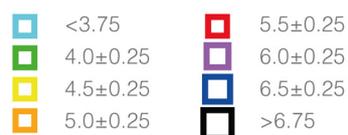


Fig. 2.1, Mappa interattiva fornita dal *Catálogo Paramétrico dei Terremoti Italiani (CPTI15)* relativa agli eventi sismici verificatisi in Italia dall'anno 1005 al 2020. https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/query_eq/

5 Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://www.ingv.it/>, u.c. gennaio 2024.

6 A. Rovida, M. Locati, R. Camassi, B. Lolli, P. Gasperini, A. Antonucci, *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15), versione 4.0.*, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), 2022.

7 “*Pericolosità sismica, in senso probabilistico, è la probabilità che un valore prefissato di pericolosità, espresso da un parametro di moto sismico del suolo (quale ad es. l’accelerazione massima) o da un grado di intensità macrosismica, venga superato in un sito dato (o in un insieme di siti) entro un dato periodo di tempo*”. Si distingue da *rischio sismico*, definito, “*in senso probabilistico, [come] la probabilità che un livello prefissato di perdite causate da terremoti sia superato entro un dato periodo di tempo in un sito, un insieme di siti oppure un’area*”. E. Faccioli, R. Paolucci, *Elementi di sismologia applicata all’ingegneria*, Pitagora, Bologna, 2005, p. 185.

8 Per approfondimenti: E. Faccioli, R. Paolucci, *Elementi di sismologia... op. cit.*, Capitolo 1.

9 M. Baratta, *I terremoti in... op. cit.*, Volume II, Introduzione.

grado di dettaglio ineguagliato fino a quel momento. L’archivio barattiano è stato il punto di partenza per la realizzazione del principale database di eventi sismici, ad opera dell’Istituto Nazionale Geofisica e Vulcanologia (INGV)⁵: il Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani⁶, che consente il libero accesso allo storico di tutti gli eventi sismici, con precisi dati tecnici. Questo si afferma così come principale fonte archivistica digitalizzata nazionale, aggiornata in tempo reale, a cui attingere per studiare specifici eventi sismici o la sismicità di un territorio.

Tra le varie cartografie tematizzate elaborate dall’INGV, la mappa relativa ai valori di *pericolosità sismica*⁷ del territorio nazionale identifica le zone con maggiore attività sismica della penisola, riscontrabili anche dall’approfondimento eseguito (vedi Scheda tematica 1): gli scuotimenti più intensi, con valori di accelerazioni del suolo superiori a 0.225 g (con $g=9.81$ m/s², accelerazione di gravità), si attestano nella Sicilia orientale, nell’arco calabro, lungo l’Appennino centro-meridionale e nell’Italia nord-orientale. Le zone individuate corrispondono, infatti, al margine di convergenza delle placche tettoniche africana ed euroasiatica.⁸

Il presente studio esamina “*l’abito sismico*”⁹, come Baratta elegantemente definisce la sismicità locale, di uno dei territori sopra citati, collocato sull’Appennino del centro Italia: la provincia abruzzese de L’Aquila. Situato nell’area occidentale della Regione Abruzzo, quasi la quasi totalità del territorio provinciale rientra nelle aree a più alto rischio sismico, come identificato

dalla mappa riportata in fig. 2.2. Analizzando sommariamente l'evoluzione storica dell'ambito territoriale, è possibile constatare come i fenomeni sismici verificatisi nel corso della storia rappresentino eventi di tale importanza da scandire il processo di sviluppo della città.

2.2 Una nuova città

2.2.1 Fondazione

L'odierna città de L'Aquila insiste su territori popolati sin dai tempi dei preromani, che risultano però particolarmente connotati dalla cultura del feudalesimo, con la quale si registrò una spiccata diffusione del fenomeno dell'incastellamento (fig. 2.3); "è in questi castelli che va ricercata la chiave [sociale] per capire l'origine della città"¹⁰.

Le prime testimonianze che documentano la fondazione de L'Aquila si ritrovano nelle lettere che, nel 1229, papa Gregorio IX stila in risposta a una specifica istanza popolare. "Per non essere vassalli cercaro la libertade"¹¹: gli abitanti dei territori, dichiaratisi vessati dalla politica di Federico II di Svevia e riconoscendo al demanio della Chiesa l'appartenenza delle terre, richiedono al pontefice la concessione per una città di nuova fondazione; come sito viene identificata la località di Acculi, baricentro geografico dei numerosi insediamenti, situata in posizione orograficamente dominante. Al 1254 risale il Diploma di fondazione, legato al nome di Federico II nonostante la paternità di Corrado IV

10 A. Clementi, E. Piroddi, *L'Aquila*, «Le città nella storia d'Italia», collana diretta da C. De Seta, Laterza, Roma-Bari, 1986, p. 12.

11 Buccio di Ranallo, *Cronica* in A. Clementi, E. Piroddi, *L'Aquila... op. cit.*, p. 15.

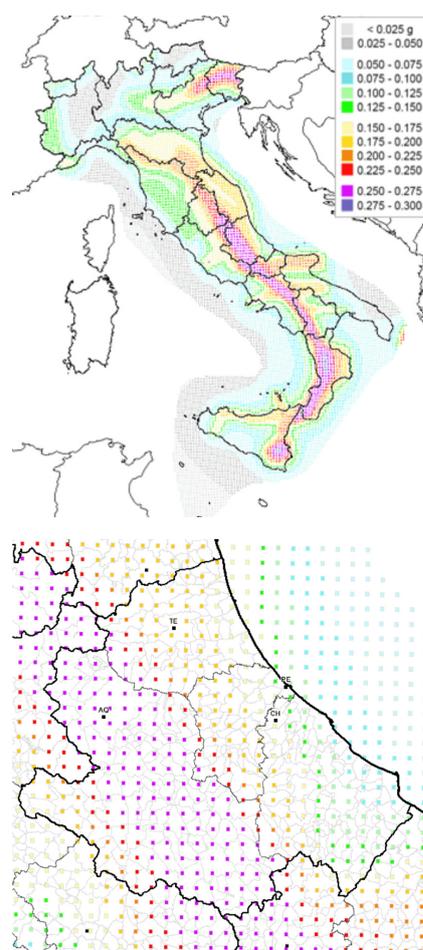
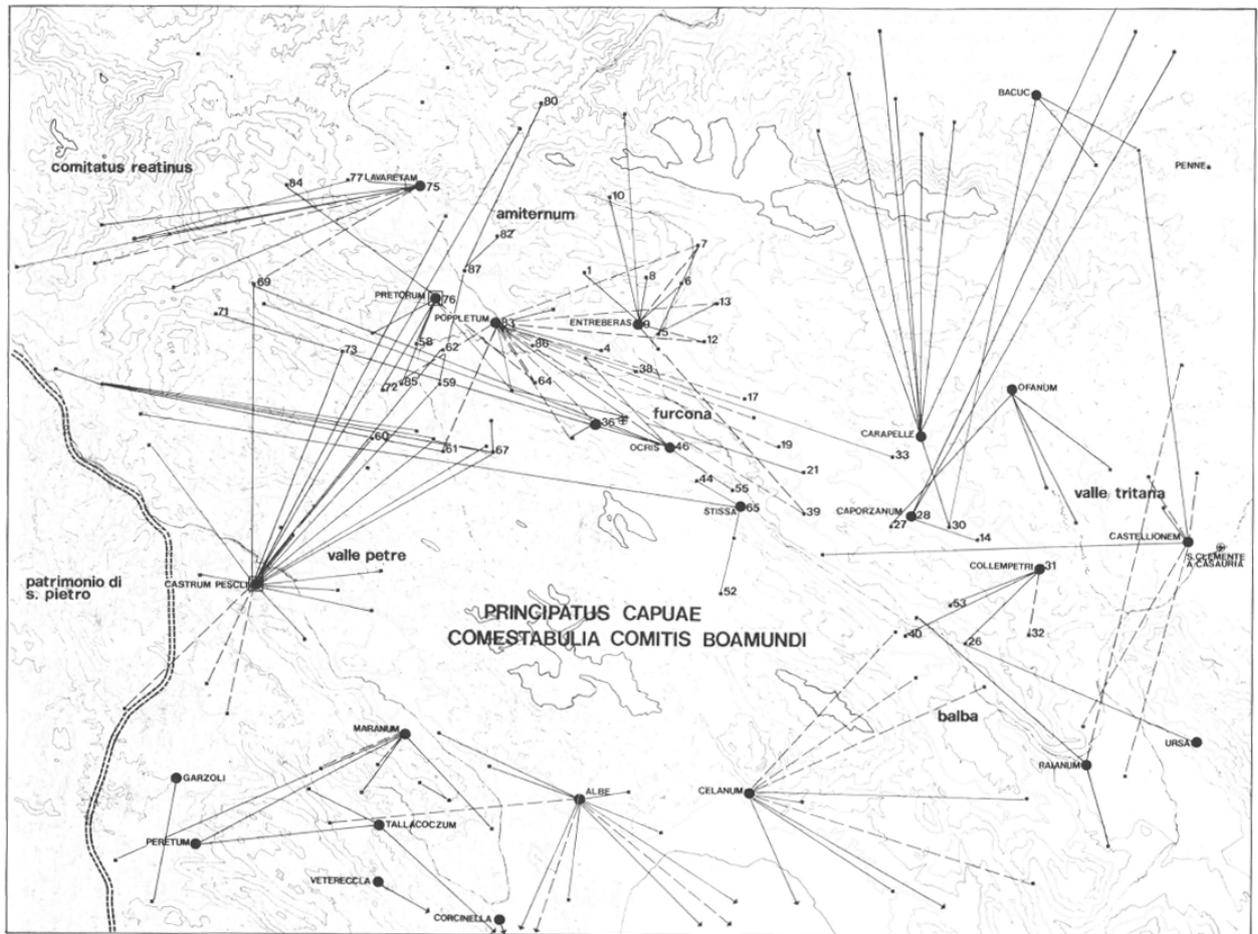


Fig. 2.2, Valori di pericolosità sismica del territorio nazionale e regionale espressi in termini di accelerazione massima del suolo. http://zonesismiche.mi.ingv.it/mappa_ps_apr04/consultazione_005.html

sia ormai conclamata, che riporta: “*laddove vi sono castelli sparsi ma fedeli, si costruisca una città che appunto si chiami Aquila, riprendendo e il nome del luogo e il nome dell'emblema vittorioso dell'impero*”¹². Vengono quindi definiti i nuovi confini territoriali e le disposizioni volte a regolamentare la condotta dei cittadini in merito alle ormai superate tradizioni feudali. Come descritto dalle fonti, *Aquila* sorge, infatti, in funzione antifeudale e consente ai propri cittadini di svincolarsi dagli obblighi legati all'antico sistema socioeconomico e di partecipare egualmente alla realizzazione del nuovo disegno cittadino. Come frequentemente accade però, l'attuazione di un'impresa di tale portata non può svincolarsi dagli interessi politici di natura superiore, che ne segnano gli sviluppi: nel 1257, papa Alessandro IV concede il trasferimento della sede episcopale da Forcona all'Aquila, per evitare che il segno politico che avrebbe caratterizzato la neonata città, legittimata da Corrado IV, fosse di origine ghibellina. Tale evento portò alla distruzione dell'Aquila per mano di Manfredi, successore di Corrado e nuovo re di Sicilia che, portando avanti la sua campagna di repressione delle autonomie comunali, nel 1259 punisce la città per la sua scelta guelfa, dopo soli cinque anni dalla prima fondazione.

2.2.II Rifondazione

La cosiddetta rifondazione o seconda fondazione della città avviene in tempi brevi, grazie alla dinastia angioina, che pone fine alla dominazione di Manfredi,



L'INCASTELLAMENTO

- rapporti di feudo
- - - rapporti di suffeudo
- centri principali
- centri minori
- ⊕ sedi religiose con obblighi feudali
- ▣ castra
- confine regno normanno

Fig. 2.3, "Il sistema dei feudi e suffeudi si organizza in aderenza alle strutture territoriali naturali [...]". A. Clementi, E. Piroddi, *L'Aquila...* op. cit., p. 10.

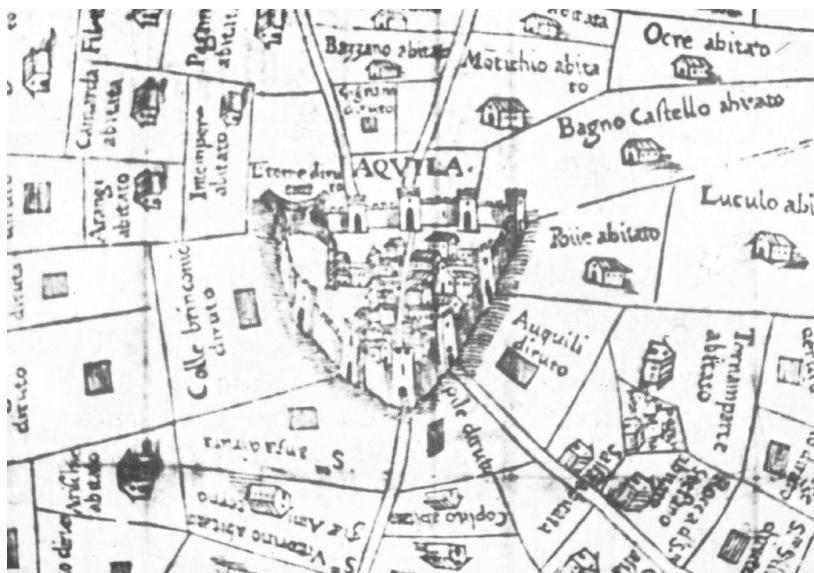


Fig. 2.4, "Le montagne del Comitatus erano ripartite tra i cittadini intus ed extra, in relazione all'asservimento di essi agli antichi castelli, la mappa probabilmente del secolo XVI visualizza questa ripartizione [...]". A. Clementi, E. Piroddi, *L'Aquila...* op. cit., p. 55.

conquistando il dominio del Regno di Sicilia grazie alla vittoria della battaglia di Benevento del 1266. Il fenomeno immigratorio dei villici dai castelli alla città non determina però né la distruzione delle rocche di origine né un netto cambio di mentalità da parte dei nuovi cittadini: la necessità di sfruttare i feudi, ormai terreni demaniali, come vaste estensioni pascolative porta la popolazione a impiantarsi in città secondo un schema che rispecchia il territorio circostante. Non rinunciando al diritto di confocolieri, i nuovi cittadini si stabiliscono all'Aquila secondo un rigido impianto organizzativo, concentrando in specifiche zone i confocolieri appartenenti allo stesso *castrum* d'origine ed erigendo in posizione centrale la cosiddetta chiesa matrice, che porta il medesimo titolo del castello d'origine; *“ed ecco la cosiddetta ‘città dei locali’: ad ogni castello è assegnato all'interno dell'area urbana uno spazio all'incirca proporzionale al numero degli abitanti, che prende il nome di locale e diviene l'«omologo» del rispettivo castello”*¹³. L'appartenenza alla parrocchia e al locale corrispondente garantiva, quindi, il mantenimento, da parte dei confocolieri, dei diritti sul territorio circostante (fig. 2.4). L'unico spazio pubblico cittadino, che viene fin da subito definito in posizione baricentrica, è la piazza del mercato, attuale piazza Duomo, che, insieme all'impianto angioino, rappresenta la più antica traccia del tessuto urbano cittadino. La struttura policentrica della città prevede, infine, l'aggregazione di locali adiacenti in quartieri, cosiddetti quarti, connotati dalla presenza di una chiesa capo di quarto (fig. 2.5).

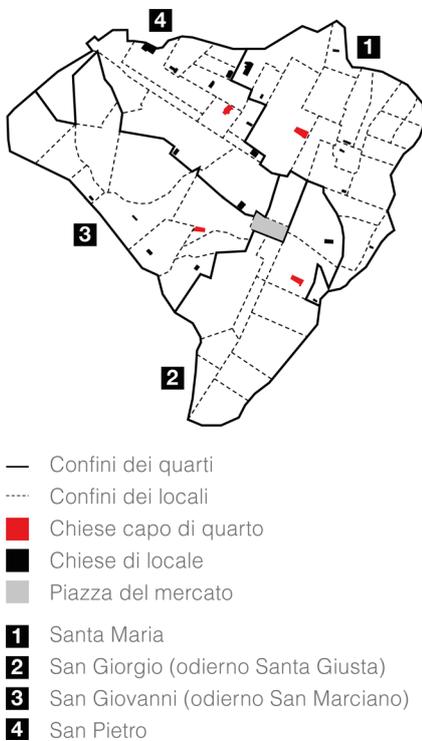


Fig. 2.5, Impianto urbano originario. Ri-elaborazione dell'autore delle mappe tematiche in A. Clementi, E. Piroddi, *L'Aquila...* op. cit., p. 33.

Se questa è l'origine sociopolitica della città de

16 E. Guidoboni, *Sismicità naturale e disastri sismici prima del Mille: il lungo periodo e i punti di vista*, in E. Guidoboni (a cura di), *I terremoti prima del Mille in Italia e nell'area mediterranea*, Storia, Archeologia, Sismologia, SGA Storia-Geofisica-Ambiente, Bologna, 1989, p. 13

17 *Idem*, p. 13. Il tema viene trattato anche in: E. Faccioli, R. Paolucci, *Elementi di sismologia applicata all'ingegneria*, Pitagora, Bologna, 2005, Capitolo 7.

18 M. Baratta, *I terremoti in... op. cit.*, Volume I, p. 45.

La seguente sintetica disamina dei principali terremoti aquilani non ha l'ambizione di una trattazione scientificamente e storicamente rigorosa, ma si pone unicamente l'obiettivo di esaminare la reazione cittadina all'evento sismico; i dati storici infatti spesso sono *“ingenui, più vicini all'aneddotica e al dato curioso che non alla riflessione storica e scientifica”*¹⁶; testi religiosi, storiografici, letterari, epigrafici non possono essere oggetto di medesime valutazioni se non accettando il rischio di incorrere in equivoci. *“Sismicità reale e sismicità raccontata rappresentano i due estremi di una forbice che generalmente tanto più si allarga quanto più si vuole andare indietro nel tempo: quanto più, quindi, le probabilità di omissioni e di vuoti dovuti al caso aumentano”*¹⁷.

2.3.1 3 dicembre 1315

*“Al 3 del mese di dicembre si sentirono fortissime scosse che frequenti si ripeterono per circa 30 giorni con intensità sempre crescente. Rovinarono molti edifici [...]: la popolazione grandemente intimorita non osava abbandonare la campagna, ove si era rifugiata, per riedere alle case.”*¹⁸

Il fenomeno sismico abbattutosi su L'Aquila alla fine dell'anno 1315 rappresenta il primo evento catastrofico per la neonata città, quando si era appena concluso l'ampliamento dell'impianto svevo, ritenuto ormai obsoleto e inadeguato al nuovo centro cittadino. Riguardo i danni subiti, le uniche testimonianze pervenute citano principalmente i casi del Duomo, il cui secolare processo di costruzione inizia nel

1257 e si conclude nel 1928, e quello della chiesa di San Francesco, entrambe fortemente danneggiate dal sisma. Anche se non riferito direttamente, dalla cronaca di Buccio di Ranallo¹⁹, è possibile dedurre che anche il tessuto edilizio residenziale doveva aver subito dei danni diffusi, tanto che la popolazione, come riportato nella *Cronica*, era stata costretta a rifugiarsi in baracche provvisorie.

2.3.II 9 settembre 1349

“[...] in Aquila sopravvenne un terremoto dei grandi e spaventevoli che si sentissero mai, che ruinò gran parte delle mura della città e tanti edifici di chiese, torri e casamenti, che per lo spavento del terremoto e la polvere dalla rovina, era rimasto ciascuno sbigottito. Si trovarono morte ottocento persone di ogni sorta [...] poche chiese rimasero in piedi [...]”²⁰

La violenza del terremoto del 1349 è ricordata da tutti gli storici che documentano la distruzione subita dalla città e le drammatiche conseguenze che la popolazione dovette affrontare. “In tale prostrazione d'animo erano caduti gli abitanti, che stavano per abbandonare i ruderi e ridursi nelle ville del contado”²¹. Il fenomeno verificatosi in minor entità nel 1315 si ripresentò in quest'occasione come una vera minaccia per gli sviluppi della città: la popolazione, già provata dall'epidemia di peste abbattutasi l'anno precedente, aveva dato avvio a un vero e proprio esodo verso le campagne. Le strade, ingombre “per i crollati edifici”²², richiedevano l'impegno non solo degli aquilani ma anche dei cittadini di centri

19 Rimatore aquilano vissuto durante il XIV secolo, è autore di diversi sonetti politici e della *Cronica* aquilana, iniziata probabilmente nella seconda metà del secolo. *Buccio di Ranallo*, voce Enciclopedia online Treccani. <https://www.treccani.it/enciclopedia/buccio-di-ranallo/>, u.c. gennaio 2024.

20 B. Cirillo, *Annali della città dell'Aquila* in M. Baratta, *I terremoti in... op. cit.*, Volume I, p. 51.

21 A. Clementi, E. Piroddi, *L'Aquila... op. cit.*, p. 52.

22 M. Baratta, *I terremoti in... op. cit.*, Volume I, p. 51.

23 A. Clementi, E. Piroddi, *L'Aquila... op. cit.*, p. 52.

24 M. Baratta, *I terremoti in... op. cit.*, Volume I, pp. 75-77.

25 Nato a Bazzano (AQ) intorno al 1430, è l'autore di *Cronache aquilane dall'anno 1436 al 1485. Angeluccio, Francesco d'*, voce Dizionario Biografico degli italiani Treccani, Volume 3 (1961). [https://www.treccani.it/enciclopedia/francesco-d-angeluccio_\(Dizionario-Biografico\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/francesco-d-angeluccio_(Dizionario-Biografico)/), u.c. gennaio 2024.

limitrofi; il loro lavoro consentì un graduale ritorno alla normalità ma soprattutto condusse il popolo a sviluppare un nuovo spirito patriottico che determinò un'inversione di tendenza: se fino ad allora la più comune reazione all'evento sismico era stata l'abbandono della città da parte degli abitanti, "*non pensando che a lor salvezza*"²³, i futuri terremoti verranno affrontati con uno spiccato senso civico e uno sviluppato attaccamento alla città, dando priorità alla ricostruzione piuttosto che alla fuga.

2.3.III 27 novembre 1461

*"I terremoti in Aquila cominciarono al 16 novembre con una scossa che fortunatamente non apportò alcun danno: il movimento sismico di maggior intensità ebbe luogo nella notte del 27 [...]; gettò a terra chiese e case, causando la morte, sì in città che nel contado, a molte persone: la popolazione intanto abbandonò le case pericolanti. Due ore dopo una nuova scossa, non meno violenta della prima, produsse danni ancora maggiori. [...] Dopo la grande scossa del 27 novembre, la terra per molto tempo fu in continuo movimento; [...] il periodo sismico può ritenersi terminato al 3 febbraio."*²⁴

Lungo è in questo caso l'elenco dei danni subiti dalla città: gli effetti sul patrimonio architettonico furono disastrosi. Baratta riporta, citando l'Antinori che riecheggia il più antico cronista Francesco d'Angeluccio di Bazzano²⁵, i danni riportati da edifici civili e principalmente religiosi. Nessuno degli edifici di culto rimase illeso: i crolli, di diversa entità,

interessarono porzioni o, in alcuni casi, la totalità delle fabbriche²⁶. Tra le varie tipologie edilizie, le torri subirono i maggiori danni.

L'eventosismico fu di tale intensità che, probabilmente, come osservato da Clementi e Piroddi, determinò “*la scomparsa definitiva dell'edilizia minore medievale*”²⁷.

Come accennato precedentemente, il fenomeno sismico si verificò tramite una sequenza di scosse prolungate nell'arco di mesi, il cosiddetto sciame sismico; a questo si deve il periodico esodo della popolazione, fomentata da “*chi fece spargere la voce che una gran parte della città sarebbe dovuta sommergere*”²⁸. Dopo ogni violento terremoto, comune era il rientro in città che prevedeva la realizzazione di opere provvisorie per ospitare gli sfollati, sfruttando i vuoti urbani come spazi di ricovero, quali la piazza del mercato e altri spazi liberi entro le mura, sempre più affini a “*vasti campi militari*”²⁹.

2.3.IV 2 febbraio 1703

“*Di questo grande periodo sismico, uno dei maggiori che abbia afflitto l'Italia centrale, presento riunite e discusse parecchie notizie.*”³⁰

La premessa di Baratta alla dissertazione dell'evento sismico verificatosi nel 1703 è indicativa della portata dello stesso: oltre all'intensa violenza con cui singoli eventi tellurici si abbattono sulle regioni dell'Italia centrale, l'estesa durata dello sciame sismico ebbe effetti devastanti su tutti i centri urbani che investì. Le prime scosse si registrano nei territori umbri dalla primavera dell'anno precedente, per raggiungere il

26 Fra le principali chiese citate da Baratta si riportano: Santa Maria di Collemaggio, San Bernardino, Santa Maria Paganica, San Silvestro, Santa Chiara, San Domenico, San Biagio, il Duomo, Santa Maria di Roio, San Marciano, Sant'Agostino, San Marco, San Francesco.

27 A. Clementi, E. Piroddi, L'Aquila... op. cit., p. 49.

28 F. Angeluccio, *Cronache aquilane dall'anno...op. cit.* in A. Clementi, E. Piroddi, L'Aquila... op. cit., p. 49.

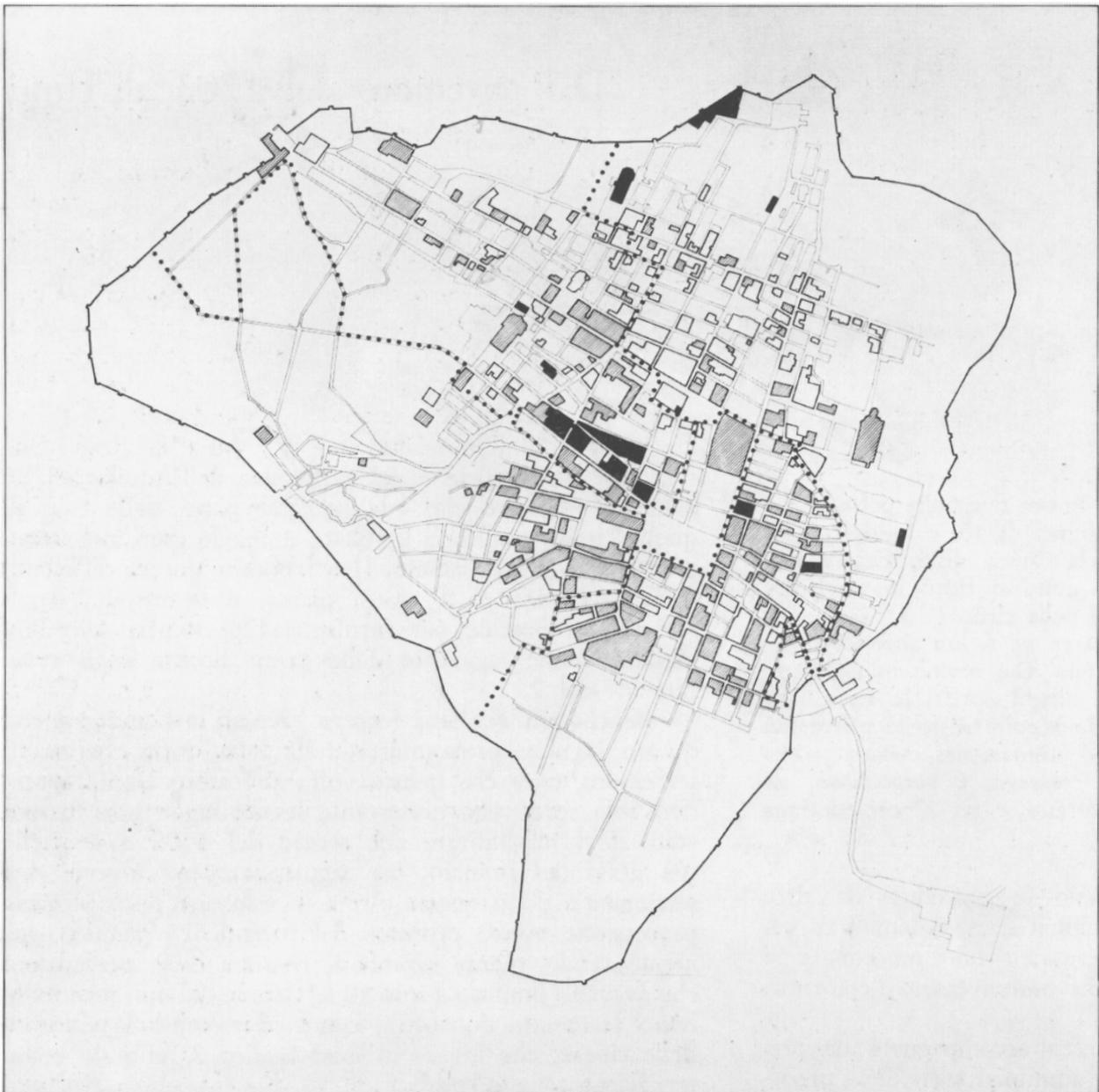
29 *Idem*, p. 49.

30 M. Baratta, *I terremoti in... op. cit.*, Volume I, p. 188.

Fig. 2.7, "Localizzazione delle principali aree di danno del terremoto del 1703 [...]. Le aree maggiormente colpite sono quelle dei quartieri di S. Giorgio e di S. Giovanni, mentre relativamente meno interessato appare il quartiere di S. M. Paganica [...]". A. Clementi, E. Piroddi, *L'Aquila... op. cit.*, p. 118.

IL TERREMOTO DEL 1703
I DANNI

-  lesioni estese e crolli parziali:
interventi di consolidamento e
parziale ricostruzione
-  crolli e lesioni gravissime:
sostituzione dell'immobile
-  edifici di cui risulta documentata
l'assenza di danni rilevanti



picco di intensità tra i mesi di gennaio e febbraio del 1703. In particolare, le scosse sismiche più violente si registrano i giorni 14 e 16 gennaio e 2 febbraio (fig. 2.7).

*“A 14 di gennaio 1703, circa le ore due della notte, fuvvi terremoto così violento [...] Replicò nel dì 16, e lesionò molte Chiese, Case e Palazzi. Rovinò la Chiesa di San Pietro Coppito, e Santa Maria di Roio, ed ognuno si ritirò in campagna e nei luoghi più aperti e spaziosi della città. Su le ore 18 di due febbraio ve ne fu un altro così violento per la scossa e per la durata, che rovinò buona parte della città, e fu veduto in più luoghi aprirsi la terra. Per quanto si poté appurare, rimasero sepolte sotto le pietre più di tremila persone [...]. La terra continuamente esalava puzzolenti vapori, l'acqua nei pozzi cresceva, e gorgogliava, gli acquedotti della Città rimasero infranti, e per 22 ore continue la terra si sentì muovere.”*³¹

Nonostante lo sciame sismico avesse allarmato la città, nessuna azione venne messa in atto per limitare il numero di vittime, che raggiunse numeri ineguagliati fino ad allora. Tra le tre scosse, egualmente intense, l'ultima, con epicentro prossimo a L'Aquila, investì con maggiore violenza la città. L'Antinori riporta che *“nello spazio di un miserere la città dell'Aquila intera fu poco meno che rovinata”*³², coerente con ciò che riferisce Uria de Llanos, secondo le cui dichiarazioni la città *“fu tutta distrutta senza che vi sia restato edificio alcuno, con mortalità grande [...]”*³³. Relativamente agli edifici di culto, la maggior parte subirono crolli totali e soltanto poche chiese riportarono danni parziali³⁴. La città versava allora in uno stato di grave

31 A. L. Antinori, Annali in A. Clementi, E. Piroddi, *L'Aquila... op. cit.*, p. 118.

32 M. Baratta, *I terremoti in... op. cit.*, Volume I, p. 190.

33 M. Baratta, *I terremoti in... op. cit.*, Volume I, p. 190.

34 Le chiese di Sant'Agostino, San Marciano, San Francesco, Santa Maria di Roio, San Domenico e la Cattedrale subirono un crollo totale; le chiese di San Pietro e Santa Giusta subirono crolli parziali e solo le chiese di Santa Maria Paganica e San Silvestro subirono danni limitati. A. Clementi, E. Piroddi, *L'Aquila... op. cit.*, Capitolo VII.



Fig. 2.8, L'iconografia legata ai fenomeni sismici è ricca di raffigurazioni simboliche, mitologiche e religiose. "Un vigoroso Atlante o Posidone erompe dalla crosta terrestre, provocando un terremoto, di cui si vedono i primi effetti nella parte superiore della scena [...]", arazzo su cartone di Raffaello, Pinacoteca Vaticana. E. Guidoboni (a cura di), *I terremoti prima... op. cit.*, p. 338.

prostrazione economica e politica³⁵, la presenza statale in città risultava blanda: il marchese della Rocca Marco Garofalo venne inviato dal viceré di Napoli de Acuña in qualità di vicario generale per i territori colpiti, assumendo i poteri di commissario straordinario; la sua azione nei mesi successivi fu incisiva: oltre a prendere importanti provvedimenti per l'ordine pubblico, riuscì ad ottenere delle esenzioni economiche dai territori colpiti e incoraggiò i cittadini nell'opera di ricostruzione, condotta con "rinnovata energia"³⁶. A causa della fragilità del potere centrale, il risanamento della città venne portato avanti dai privati e dalla Chiesa: "ne derivò una ricostruzione per frammenti architettonici, lasciando intatto il tracciato urbanistico di base"³⁷. In particolare, ben testimoniata da fonti documentarie è la presenza a L'Aquila di architetti provenienti da Roma, che caratterizzarono in maniera decisa la nuova architettura e la lenta ripresa cittadina.

2.4 L'evoluzione delle tecniche costruttive

2.4.1 Il terremoto come «causa»: prime riflessioni e accorgimenti antisismici

"È antica leggenda, cantata dai poeti, che Tifone, sepolto nell'isola di Procida, si agita frequentemente sotto terra, sì da far tremare l'isola sin nel più profondo: in tal modo fu trasfigurato poeticamente il fatto che Procida viene scossa da terremoti ed eruzioni [...]"³⁸

(fig. 2.8)

Il processo che portò ad osservare i devastanti effetti dei terremoti e a trarne nuovi insegnamenti da applicare nel campo della scienza del costruire è stato lungo e insidioso. Per secoli, gli esponenti più eruditi dei popoli, che si susseguirono in tempi e luoghi differenti, tentarono di trovare una spiegazione al fenomeno sismico, ricorrendo a fattori naturali o mitologici: i quattro elementi primigeni, le congiunzioni astrali, la furia o il castigo di divinità vendicative o precettrici.³⁹ L'impegno nell'indagare le cause dei terremoti non venne corrisposto in egual misura dalla ricerca di nuove tecniche costruttive che potessero mitigarne gli effetti distruttivi. Nel XVI secolo, Pirro Ligorio anticipò un nuovo paradigma che avrebbe consentito di approdare, due secoli dopo, a nuove soluzioni tecniche; nel suo trattato⁴⁰, sviluppò interessanti considerazioni, portando avanti una sbeffeggiante polemica nei confronti dei coevi autori, e sviluppando il primo prototipo di *casa antisismica* (vedi Scheda tematica 3).

Tale premessa giustifica, anche nel territorio aquilano, l'incertezza relativa allo sviluppo di sistematici interventi di consolidamento e di nuove tecniche costruttive. Certo, è, invece, che le opere di ricostruzione che seguirono i violenti terremoti, precedentemente citati, non sconvolsero l'assetto urbano che, nonostante le catastrofiche conseguenze sismiche, rimase invariato, mantenendo l'originale impianto medievale (figg. 2.9, 2.10, 2.11, 2.12).

È comunque possibile individuare elementi, che caratterizzano la prassi costruttiva tipica del territorio

35 La morte di Carlo II di Spagna, avvenuta nel 1700, innescò le guerre di successione al trono che portarono alla perdita dei territori del Regno di Napoli da parte della Spagna e, nel 1707, all'insediamento del vicereame austriaco. D. del Pesco, *Il barocco aquilano e i terremoti*, in C. Conforti, V. Gusella (a cura di), *AID MONUMENTS. Conoscere progettare ricostruire*, Volume I, Aracne, Roma, 2013, pp. 85-103.

36 A. Clementi, E. Piroddi, *L'Aquila... op. cit.*, p. 90.

37 D. del Pesco, *Il barocco aquilano... op. cit.*, p. 88.

38 S. Di Pasquale, *Architettura e Terremoti*, prefazione in A. Guidotti, *Questioni di dinamica per il restauro dei monumenti*, Quaderni di restauro dei monumenti e di urbanistica dei centri antichi, «Edizioni Scientifiche Italiane», 11, 59-60-61, 1982, p. 14.

39 Le prime teorie riguardo l'origine dei terremoti e le prime singolari soluzioni avanzate, come la realizzazione di pozzi per consentire lo sfiatamento di vapori sotterranei, sono ampiamente trattate in: S. Di Pasquale, *Architettura e Terremoti... op. cit.*; S. Di Pasquale, *L'arte del costruire tra conoscenza e scienza*, Marsilio, Venezia, 1996, Capitolo 2; E. Guidoboni (a cura di), *I terremoti prima... op. cit.*

40 E. Guidoboni (a cura di), *Pirro Ligorio. Libro di diversi terremoti*, «Edizione Nazionale delle Opere di Pirro Ligorio», Libri delle Antichità, Torino, Volume 28, De Luca Editori d'Arte, Roma, 2005.



Fig. 2.9, Il Gonfalone di Giovanni Paolo Cardone, 1579. Una delle prime rappresentazioni della città di Aquila, in cui si distinguono le emergenze architettoniche e urbane. A. Clementi, E. Piroddi, *L'Aquila... op. cit.*, pp. 92-93.

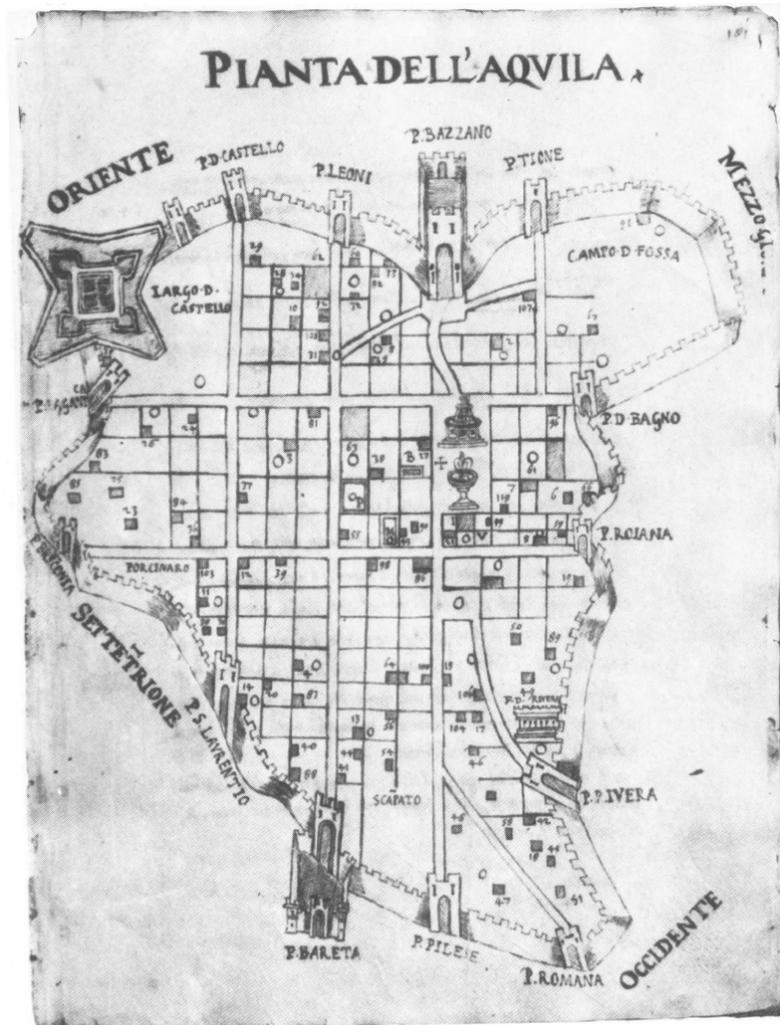


Fig. 2.10, Pianta de L'Aquila, Girolamo Pico Fonticulano, 1575. Prima rappresentazione topografica della città, elaborata secondo le tendenze culturali dell'epoca, votate al rigore e alla geometria. A. Clementi, E. Piroddi, *L'Aquila... op. cit.*, p. 94.

Nella pagina a fianco:

Fig. 2.11, Pianta de L'Aquila, Girolamo Pico Fonticulano incisa da Jacopo Lauro, 1600. Caratterizzata da una maggiore aderenza alla realtà, la cartografia documenta anche l'edilizia minore. A. Clementi, E. Piroddi, *L'Aquila... op. cit.*, p. 98.

Fig. 2.12, Pianta prospettica de L'Aquila, Scipione Antonelli incisa da Jacopo Lauro, 1622. A. Clementi, E. Piroddi, *L'Aquila... op. cit.*, p. 102.

41 Tali strutture si sono evolute in volumi di sovrappasso, incidendo sulla struttura urbana cittadina sia dal punto di vista del costruito sia per la toponomastica, spesso influenzata dalla presenza di tali elementi. C. Carocci, S. Lagomarsino, *Gli edifici in muratura nei centri storici dell'Aquilano*, «Progettazione sismica», 3, 2009, pp. 117-131.

42 A. Ceradini, *Tecniche premoderne antisismiche dell'Abruzzo Aquilano: gli archi soprastrada*, in A. Marino (a cura di), *Presidi antisismici nell'architettura storica e monumentale*, Atti della I Giornata di Studio promossa dalla Soprintendenza B.A.A.A.S per l'Abruzzo e dal Dipartimento di Architettura e Urbanistica dell'Università dell'Aquila, Gangemi, Roma, 2000. pp. 73-80.

43 Per approfondimenti: S. Benedetti, *Cenni storici e caratteristiche tipologico-spaziali della nuova fabbrica seicentesca*, in S. Benedetti, M. P. Sette (a cura di), *Matrici di un impianto chiesastico tardo-barocco. Il caso di San Giovanni Battista a Morbegno e gli sviluppi europei. Questioni aperte tra storia e restauro*, Quasar, Roma, 2021, pp. 15-46.



Fig. 2.13, Archi di contrasto demoliti durante i primi anni del novecento nel centro storico de L'Aquila. A. Clementi, E. Piroddi, *L'Aquila... op. cit.*, p. 48.

aquilano di questi secoli, probabilmente riconducibili a esigenze di tipo strutturale per far fronte agli effetti sismici.

A questi, è possibile ricondurre il sistema degli incatenamenti metallici, diffuso sia nell'edilizia civile che religiosa, impiegato nei diversi ordini della struttura e volti a limitarne i movimenti in direzione sia longitudinale che trasversale. La maggior parte delle fabbriche religiose presentano anche elementi murari di contrasto, realizzati esternamente lungo i setti longitudinali, in corrispondenza delle strutture spingenti interne, per contrastarne la spinta; furono messe a punto o come semplici ispessimenti localizzati o come contrafforti. Elementi simili e con la medesima funzione, fortemente caratterizzanti i centri minori⁴¹ ma ormai quasi scomparsi nel centro storico aquilano, sono le strutture ad *archum lapideum*⁴² (fig. 2.13): archi di contrasto finalizzati a stabilizzare gli edifici con fronti paralleli, tramite il loro collegamento. Altra tematica, presumibilmente riconducibile anche alla prassi costruttiva antisismica, riguarda le trasformazioni figurative e spaziali che interessano gli edifici religiosi tra il XVI e il XVII secolo⁴³; molti sono i casi in cui l'adeguamento alle nuove disposizioni post-tridentine determina una riconfigurazione spaziale che ben si sposa con le ormai affermate esigenze strutturali: l'intervento che meglio esprime questo binomio è quello che prevede la suddivisione delle navate laterali finalizzata alla realizzazione di cappelle affiancate allo spazio centrale della chiesa, come accade nella chiesa di Santa Giusta; numerosi sono gli esempi di nuove costruzioni che perseguono i

medesimi indirizzi, come le chiese di Santa Margherita e quella di San Filippo. Diversi sono anche gli edifici di culto in cui l'abbassamento dei setti perimetrali, per adeguare lo spazio ai nuovi criteri proporzionali, rende meno vulnerabili gli stessi elementi murari; è il caso della Basilica di Collemaggio.

In conclusione, è possibile evidenziare un ultimo aspetto che, nonostante non rappresenti un vero e proprio presidio antisismico, è esemplificativo della buona prassi costruttiva tipica dei territori aquilani: i cantonali costituiscono elementi fondamentali nella risposta sismica dell'edificio, poiché ne garantiscono, per quanto possibile, il comportamento scatolare; la loro realizzazione fu, per questo, da sempre particolarmente curata nel territorio aquilano, attraverso l'uso di blocchi di notevoli dimensioni, di buona fattura e ben ingranati fra loro (fig. 2.14).⁴⁴

2.4.II Il terremoto come «effetto»: lo sviluppo dei primi presidi antisismici

“[...] quando si conosce la cagione di un male, è facile di rimediarvi.”⁴⁵

Il fermento culturale che investe l'Europa tra il XVIII e il XIX secolo determina importanti sviluppi tecnico-scientifici e innovative sperimentazioni tecnologiche in ambito sismico. *“Per giungere alla conclusione che si potesse fornire qualche ulteriore specificazione dei canoni costruttivi in zone soggette al pericolo del terremoto, occorreva principalmente un nuovo atteggiamento nei riguardi del fenomeno, così da*

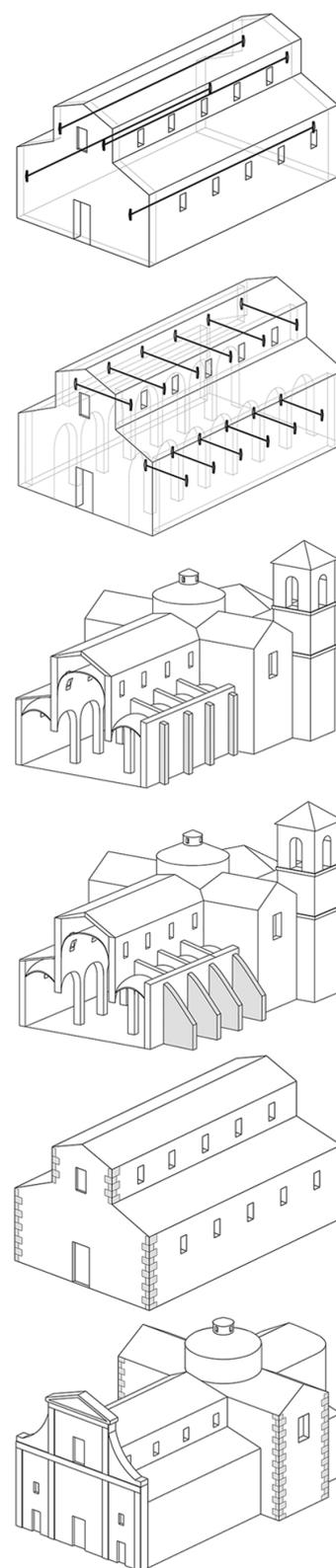


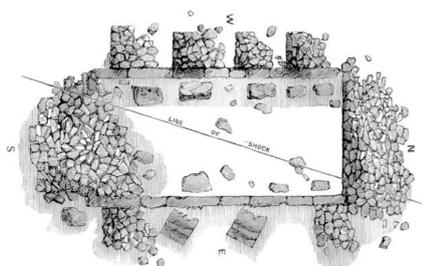
Fig. 2.14, Primi accorgimenti antisismici. G. De Matteis, G. Brando, V. Corlito, *Predictive model for seismic vulnerability assessment of churches based on the 2009 L'Aquila earthquake*, «Bulletin of Earthquake Engineering», 17, 2019, p. 4921.

44 Per approfondimenti: D. Fiorani, *Il perenne ciclo del divenire nel cantiere storico aquilano. Annotazioni su tessuto urbano architetture e costruzione nella città dei terremoti*, «Città e storia», VI, Università degli Studi Roma Tre – CROMA, 2011; L. Zordan, M. Centofanti, P. De Berardinis, G. Di Giovanni, A. Bellicoso, *Il cantiere antico nelle zone interne d'Abruzzo: tecniche costruttive e accorgimenti antisismici*, in A. Marino (a cura di), *Presidi antisismici... op.cit.*, pp. 69-72.

45 G. Vivenzio, *Istoria e teoria de' tremuoti in generale ed in particolare di quelli della Calabria, e di Messina del MDCCCLXXXIII*, Stamperia Reale, Napoli, 1783, p. CXIV, in Vivenzio, *Giovanni*, voce Dizionario Biografico... op. cit..

46 S. Di Pasquale, *L'arte del costruire... op. cit.*, p. 161.

47 Robert Mallet pose le basi alle discipline della sismologia e dell'ingegneria sismica dopo le indagini relative al terremoto della Basilicata del 1857, dopo le quali avanzò l'ipotesi di poter risalire alle onde d'urto sismiche dal rilievo del danno (fig. 2.15). E. Faccioli, R. Paolucci, *Elementi di sismologia... op. cit.*



47 Studi di Mallet sugli effetti sismici di un edificio murario. A. Giannantoni, *Consolidamento delle strutture... op. cit.*, p. 29.

*non considerarlo più come una punizione divina*⁴⁶; a questo periodo risalgono, infatti, i primi studi dedicati al funzionamento meccanico della crosta terrestre, che segnano la nascita della moderna sismologia⁴⁷, accompagnati da sperimentazioni di nuove tecniche costruttive volte ad attenuare i devastanti effetti dei fenomeni sismici.

In particolare, si assiste all'impiego di elementi lignei che conferiscono alle strutture murarie maggiore flessibilità, irrigidendone le connessioni. Tale prassi si diffuse principalmente dopo i catastrofici terremoti di Lisbona del 1755 e calabro-messinese del 1783, le cui opere di ricostruzione prevedero l'impiego della *gaiola* pombalina e della casa baraccata (vedi Scheda tematica 4); a detti eventi sismici seguì l'emanazione delle *Istruzioni Reali*⁴⁸, che costituiscono le prime norme dichiaratamente antisismiche messe a punto dal Governo Borbonico, durante la reggenza di Ferdinando IV. Nonostante ciò, l'impiego di elementi lignei, finalizzato a consolidare le connessioni degli edifici, era già prassi costruttiva nei territori del nord Italia; in questo caso però, le esigenze a cui far fronte non erano di natura sismica ma di carattere militare: tali tecniche furono adottate a partire dal XVI secolo per dotare l'edificio di presidi che si opponessero ad azioni dinamiche, quali i cannoneggiamenti.⁴⁹

Si assiste, quindi, al cambio di paradigma, che guida verso lo sviluppo dei primi presidi antisismici, secondo il quale *“il terremoto non interessa più come causa ma come effetti”*⁵⁰: gli studi condotti sono, quindi, ora indirizzati verso le conseguenze che i fenomeni sismici hanno sul costruito, piuttosto che indagarne

le cause.

Contestualmente a ciò che accade in ambito europeo, anche nel territorio aquilano, si assiste allo sviluppo di nuove tecniche costruttive per contrastare la furia sismica, soprattutto in seguito del terremoto del 1703. La maggiore consapevolezza della vulnerabilità dell'edilizia muraria storica porta allo sviluppo dei primi presidi antisismici locali. Le nuove tecniche applicate non furono però regolamentate da alcuna prescrizione: questo comportò la mancata codifica e comprensione dei sistemi sperimentati, la cui importanza è stata riconosciuta solo in tempi recenti, dopo il terremoto del 2009.

La tecnica antisismica aquilana del XVIII secolo si caratterizza per un fattore di primaria importanza: essa è definita come una “*tecnica di ricostruzione*”⁵¹, che si contrappone a quella che contraddistingue il XIX secolo. Il terremoto del 1703 aveva, infatti, prodotto ingenti danni al tessuto edilizio cittadino; questo consentì la sperimentazione di nuove tecniche costruttive che non si limitassero a semplici adeguamenti sismici delle fabbriche, ma che potessero essere integrate nella compagine muraria, mettendo in atto così una maggiore efficacia nell'attenuazione dei danni alla struttura edilizia. La ricostruzione ha, quindi, permesso di sviluppare tecniche ambiziose, volte non a limitare specifici meccanismi ma a “*conferire un comportamento unitario all'assemblaggio di per sé discontinuo della costruzione muraria. [...] Quella primitiva tecnica antisismica riconosce implicitamente nell'ideale [...]*

48 Regno di Napoli, *Norme tecniche ed edilizie per ricostruire le case distrutte*, anche note come *Istruzioni Reali*, 20 marzo 1784, in A. Giannantoni, *Consolidamento delle strutture murarie: analisi critica sull'efficacia dei rinforzi statici in Italia centrale tra fine del XIX e inizio del XX secolo*, Tesi di Dottorato di Ricerca, Facoltà di Architettura, La Sapienza, Relatrice: D. Fiorani, a.a. 2021-2022.

49 Per approfondimenti: C. Carocci, V. Macca, C. Tocci, *The roots of the 18th century turning point in earthquake-resistant building*, in J. Mascarenhas-Mateus, A. P. Pires (a cura di), *History of Construction Cultures*, Volume 2, CRC Press Balkema, Lisbona, 2021, pp. 623-63; E. Piccoli, C. Tocci, *A prova di bomba. Ingegneri, architetti e teorie sulle volte in un cantiere militare di metà Settecento*, «ArchistoR», VI, 12, 2019, pp. 213-251.

50 S. Di Pasquale, *Architettura e Terremoti... op. cit.*, p. 6.

51 C. Carocci, C. Tocci, *Le tecniche costruttive nella ricostruzione post 1703*, «Quaderni dell'Istituto di Storia dell'Architettura», 73-74, D. Esposito, V. Montanari (a cura di), *Realtà dell'architettura fra materia e immagine. Per Giovanni Carbonara: studi e ricerche*, Volume II, L'Erma di Bretschneider, Roma, 2021, p. 30.

52 “[...] le ossature [degli edifici] saranno da riunire alle ossature, ed esse tutte da rafforzare nel modo più opportuno con nervi e legamenti; sicché la successione delle ossature collegate tra loro, risulti tale da resistere da sola, quand’anche ogni altro elemento venisse a mancare [...]”
 Leon Battista Alberti, *De re aedificatoria*, edizione curata da P. Portoghesi e G. Orlandi sull’*Editio princeps* del 1485, Il Profilo, Milano, 1966, in Carocci, C. Tocci, *Le tecniche costruttive... op. cit.*, p. 30.

53 C. Carocci, C. Tocci, *Le tecniche costruttive... op. cit.*, p. 30.

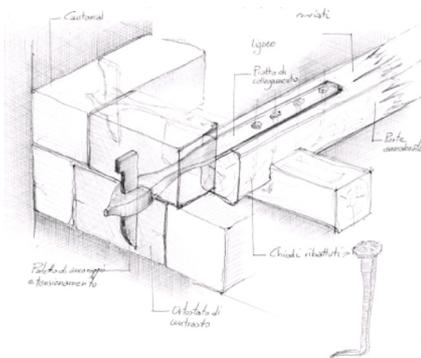


Fig. 2.16, Dettaglio costruttivo di radiciamento d’angolo, con sistema di connessione a paletto posto a contrasto del paramento. G. Cangì, *Murature tradizionali e terremoto*, Atti del convegno *Restaurare dopo terremoto*, ARCo – Associazione per il Recupero del Costruito, 2009, p. 16.



Fig. 2.17, Radiciamento di connessione tra pareti ortogonali in Palazzo Ardinghelli. C. Carocci, C. Tocci, *Le tecniche costruttive... op. cit.*, p. 31.

di Leon Battista Alberti⁵² la chiave per consentire alle fabbriche murarie la necessaria resistenza alla furia devastante del terremoto⁵³.

I principali elementi innovativi introdotti dopo il terremoto del 1703 si caratterizzano per l’impiego del legno, materiale flessibile e resistente anche a taglio e a trazione nella direzione delle fibre in particolare; in particolare, vengono sviluppati tre dispositivi fortemente caratterizzanti l’aquilano e frutto delle sperimentazioni perpetuate nei territori limitrofi: i radiciamenti, le impalettature e il cosiddetto baraccato aquilano.

I radiciamenti (figg. 2.16, 2.17) si configurano come cerchiature lignee integrate nello spessore murario, il cui impiego è sistematico nell’aquilano; la geometria si presenta più o meno regolare, così come la tecnica più o meno raffinata, in funzione al pregio della fabbrica oggetto dell’intervento. È possibile reperire detti elementi principalmente nella mezzeria dei setti murari e nelle porzioni più vulnerabili, come nei cantonali e tra gli architravi e le sovrastanti strutture di orizzontamento; esternamente, sono segnalati da chiavi metalliche di modeste dimensioni, ancorate a un piatto chiodato agli elementi lignei.

Le impalettature consistono invece in elementi lignei finalizzati a collegare le strutture di elevazione con quelle di copertura; sono diffuse, sia nell’edilizia corrente che di pregio, le cosiddette *capriate impalettate* (figg. 2.18, 2.19): la tecnica prevede l’impiego di un elemento ligneo sporgente simmetricamente rispetto alla sezione muraria, che

consente all'interno la chiodatura all'intradosso della catena lignea e all'esterno di ospitare un paletto ligneo posto verticalmente. Anche le strutture voltate vengono dotate di elementi lignei; in particolare nelle volte a padiglione (figg. 2.20, 2.21) sono distinguibili nei fusi e alla quota delle reni, connessi tra loro tramite chiodatura per realizzare una cerchiatura completa, e nelle volte a botte disposti parallelamente alle generatrici.⁵⁴

Osservando i danni subiti dall'edilizia del centro storico aquilano, è stato possibile rilevare, dopo l'evento del 2009, la presenza di strutture intelaiate lignee interne alla compagine muraria, la cui natura è paragonabile a quella della casa baraccata precedentemente descritta, e per questo identificate con l'espressione di "baraccato aquilano"⁵⁵. La mancanza di codifiche relative all'utilizzo di questi presidi fa sì che la tecnica si presenti in diverse varianti; in particolare, sono state identificate sei differenti tipologie di intelaiature lignee, i cui parametri variabili consistono nella tipologia di muratura rinforzata, nelle dimensioni e nella geometria degli elementi costituenti. In generale, è possibile descrivere sommariamente le strutture come un sistema di assi lignei di differenti sezioni, connessi tramite chiodatura o con incastri a tenone e mortasa, finalizzati a suddividere il setto murario in più elementi snelli, consentendo così non tanto di conferire maggiore resistenza alla parete, quanto di aumentarne la deformabilità: diminuendo la rigidità nel piano di giacitura è, infatti, possibile migliorare la capacità dissipativa, attenuando così l'effetto dell'evento sismico sull'elemento in questione.

54 Per approfondimenti: C. Carocci, C. Tocci, *Le tecniche costruttive... op. cit.*

55 A. Aloisio, *The timber-framed (TF) masonries in L'Aquila: the baraccato aquilano*, «Heritage», 30, 18, 2020.



Fig. 2.18, Paletto di una capriata in Palazzo Camponeschi. C. Carocci, C. Tocci, *Le tecniche costruttive... op. cit.*, p. 33.

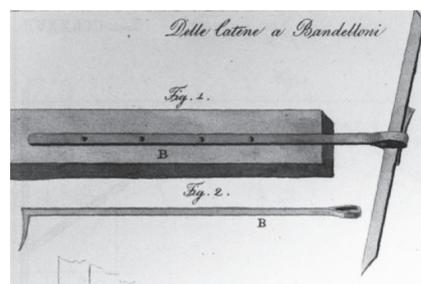


Fig. 2.19, Travi lignee con capochiave metallico nel trattato di Valadier, coinvolto nella ricostruzione della città dopo il terremoto del 1703. G. Valadier, *L'architettura pratica: dettata nella scuola e cattedra dell'insigne Accademia di S. Luca dal prof. sig. cav. Giuseppe Valadier: data alla luce dagli incisori d'architettura Giacomo Rocruè ed Eleuterio Catesi*, Tomo IV, Roma, 1833 in L. D. Decanini, D. Liberatore, L. Liberatore, E. Raglione, L. Sorrentino, *Chiesa di San Biagio d'Amiternum. Analisi dei danni causati dal terremoto del 6 aprile 2009 al patrimonio culturale*, Vice-Commissariato Straordinario per i Beni Culturali Danneggiati dal Terremoto del 6 Aprile 2009, Università degli studi di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, 2009, p. 23.

56 Il gruppo di architetti di stampo berniniano e borrominiano si occupò di numerosi edifici religiosi; tra i principali si citano gli impianti ellittici di Santa Caterina, Sant'Agostino, la cui paternità è di Contini, e dell'Oratorio di San Giuseppe dei Minimi e l'importante progetto per la Chiesa di Santa Maria del Suffragio, prospiciente piazza Duomo, sviluppato da Buratti, con il disegno della facciata di Leomporri e la cupola firmata da Valadier. D. del Pesco, *Il barocco aquilano...* op. cit..

57 D. Fiorani, *Il perenne ciclo...* op. cit..

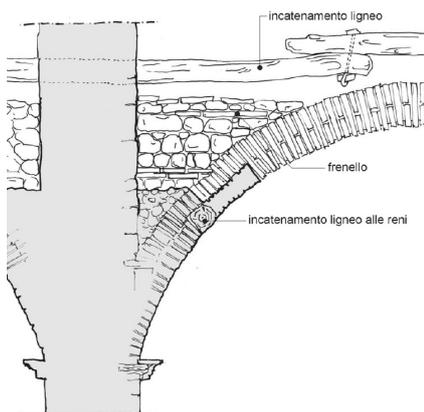


Fig. 2.20, Dettaglio costruttivo della volta a padiglione rappresentata in fig. 16. C. Carocci, C. Tocci, *Le tecniche costruttive...* op. cit., p. 32.



Fig. 2.21, Elementi lignei collocati alla quota delle reni della volta a padiglione in Palazzo Ardinghelli. C. Carocci, C. Tocci, *Le tecniche costruttive...* op. cit., p. 32.

Le intelaiature, infine, non sono impiegate in tutte le pareti dei fabbricati presi in analisi ma solo nei setti maggiormente esposti all'azione sismica (vedi Scheda tematica 5).

I presidi sopra elencati sono i più diffusi e caratterizzanti il patrimonio edilizio dei territori dell'aquilano: la loro presenza è, infatti, ampiamente riscontrabile anche nei centri minori circostanti L'Aquila, seppur con minore sapienza costruttiva e impiegando materiali di qualità inferiore.

Ultimo fattore rilevante relativo alla ricostruzione de L'Aquila del 1703 è l'influenza tecnica e stilistica delle maestranze e degli architetti provenienti da Roma, la cui presenza nel capoluogo abruzzese durante la ricostruzione è ampiamente testimoniata. Il nuovo linguaggio barocco portò alla progettazione di impianti ellittici e apparati decorativi dal rinnovato gusto, sia negli edifici religiosi⁵⁶ che nei palazzi nobiliari. Sotto l'aspetto tecnico, trovò grande fortuna ed impiego l'uso di due sistemi costruttivi: le volte laterizie in foglio e le volte in camorcanna, o incannucciato, caratterizzate da centine portanti lignee (fig. 2.22). Entrambe le soluzioni si contraddistinguono per la loro spiccata leggerezza, per questo motivo sono spesso impiegate ai piani superiori degli edifici per alleggerire i carichi.⁵⁷

La mancata conoscenza e comprensione dei primi presidi antisismici, impiegati nel territorio aquilano dopo il terremoto del 1703, ha portato a restauri che, come verrà successivamente riportato, tendono

ad occultare e ad alterare le logiche costruttive e strutturali delle fabbriche storiche. Molti presidi tradizionali, sopra descritti, sono stati rimossi dalle fabbriche e spesso sostituiti con nuove tecnologie, estranee e incompatibili con il costruito storico, compromettendone così, oltre i valori storici e architettonici, anche l'integrità strutturale, come il terremoto del 2009 ha drammaticamente confermato.⁵⁸

58 S. Cecamore, *La ricostruzione aquilana, antichi e nuovi presidi*, «ArcHistoR», II, 4, 2015, pp. 119-151.

2.5 I restauri moderni

2.5.1 Continuità (XIX secolo)

Il XIX secolo è caratterizzato da eventi sismici di minore intensità rispetto a quelli precedentemente presentati; i danni riportati dall'edilizia cittadina non sono paragonabili con le devastazioni che i centri subirono durante i secoli precedenti e, come questi, anche gli interventi condotti sono stati di natura differente. Contrapponendosi alla “*tecnica di ricostruzione*” settecentesca prima definita, gli interventi effettuati durante l'ottocento erano prevalentemente finalizzati alla riparazione e al rinforzamento delle fabbriche storiche, limitandosi ad apportare aggiunte di carattere tecnico che non comportassero interventi massivi o invasivi per l'edificio. Sia dal punto di vista tecnico che materico è possibile affermare che il cantiere ottocentesco si pone in continuità con quello tradizionale e con il palinsesto architettonico e costruttivo preesistente: i materiali impiegati sono coerenti con quelli originari, mantenendo vivo il costante riferimento alla regola

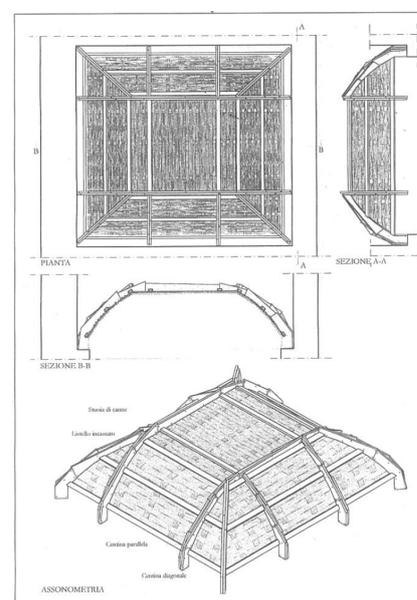


Fig. 2.22, Rilievo di una volta a padiglione realizzata con tecnica ad incannucciato. C. Varagnoli, *Lo stato dell'arte in Abruzzo*, in G. Fiengo, L. Guerriero (a cura di), *Atlante delle tecniche costruttive tradizionali. Lo stato dell'arte, i protocolli della ricerca. L'indagine documentaria*, Atti del I e del II Seminario Nazionale, p. 55.

59 Per approfondimenti: A. Giannantoni, *Consolidamento delle strutture... op. cit.*; C. Carocci, C. Tocci, *Le tecniche costruttive... op. cit.*; A. G. Pezzi, *Tecniche e materiali tradizionali nei cantieri di restauro abruzzesi*, in G. Fiengo, L. Guerriero (a cura di), *Atlante delle tecniche... op. cit.*, pp. 180-185.

60 Come tutte le grandi città italiane, anche L'Aquila è interessata dal fermento culturale che vede la realizzazione di nuove infrastrutture, l'adeguamento delle esistenti rispetto alle nuove norme igieniche e l'ampliamento urbano. A. Clementi, E. Piroddi, *L'Aquila... op. cit.*, Capitolo VIII.

61 C. Bartolomucci, *Gli effetti del terremoto del 1915 nella città di Aquila: i danni e gli orientamenti per il restauro*, in S. Ciranna, P. Montuori, *Avezzano, la Marsica e il circondario a cento anni dal sisma del 1915. Città e territori tra cancellazione e reinvenzione*, Ufficio Stampa del Consiglio Regionale dell'Abruzzo, 2015, pp. 151-161.

62 C. Bartolomucci, *La dialettica tra eresie e ortodossie nei restauri in Abruzzo, dagli anni Sessanta all'attuale 'ricostruzione' post sismica*, collana «Scienza e Beni culturali», Giornate di studi Bressanone 2016, *Eresia ed ortodossia nel restauro. Progetti e realizzazioni*, Arcadia Ricerche, p. 687.

dell'arte e l'inserimento di nuovi presìdi, comunque caratterizzati da nuove geometrie e tecnologie, non entrano in conflitto con i dispositivi già presenti. Molti di essi, come i nuovi sistemi di incatenamento, venivano, infatti, progettati come raddoppi o rinforzi di presìdi esistenti, o ancora come addizioni atti a sistematizzare la disposizione dei presìdi antisismici all'interno delle fabbriche.⁵⁹

2.5.II *Frattura (XX secolo)*

È, quindi, possibile affermare che l'edilizia ottocentesca non apporta modifiche significative alle pratiche costruttive già in uso durante il settecento; tendenza che non viene confermata per gli interventi di restauro condotti durante il XX secolo. Durante la prima metà del secolo non si assiste a grandi interventi di tipo tecnico costruttivo, quanto più a risoluzioni di natura urbana.⁶⁰ I danni dovuti al distruttivo terremoto di Avezzano del 1915 sono limitati nel capoluogo⁶¹, soprattutto se paragonati alla violenza devastatrice con cui l'evento sismico si abbatté sui centri minori limitrofi; nonostante la portata dell'evento, poche sono state le innovazioni rilevate in città. Il periodo di maggiore fermento in ambito costruttivo, in particolare in quello del restauro, si è registrato negli anni compresi tra il 1966 e il 1972, noti per gli interventi condotti dal Soprintendente all'Archeologia e Belle Arti d'Abruzzo e Molise Mario Moretti. La cosiddetta "*questione abruzzese*"⁶² sorge dalle numerose e aspre critiche, a livello nazionale, rivolte ai restauri intrapresi nei principali beni architettonici

del capoluogo italiano, in particolare agli edifici di culto. La mancata sensibilità e comprensione delle vicende storiche costruttive delle fabbriche, comprensive degli importanti pionieristici presidi antisismici realizzati, l'atteggiamento discriminatorio nei confronti del palinsesto costruttivo, l'indiscutibile fiducia nelle nuove tecnologie hanno condotto a interventi definiti come “*eresie del restauro*”⁶³, accusati di aver stravolto i beni architettonici sotto l'aspetto figurativo, materico e strutturale. Le invasive, oltre che distruttive, opere di restauro, che trovano dei predecessori negli interventi portati avanti tra il 1940 e il 1960 dagli uffici tecnici del Genio Civile e da Umberto Chierici⁶⁴, sono generalmente finalizzate, sotto l'aspetto stilistico, a rimuovere l'apparato barocco dell'edificio per «ripristinarne» l'aspetto medievale. L'operazione così condotta consiste in un vero e proprio processo di rimozione, occultamento e alterazione delle tecniche tradizionali. L'impiego pervasivo di calcestruzzo armato, finalizzato al miglioramento del comportamento sismico della struttura, non viene denunciato all'esterno ma, al contrario, viene dissimulato e occultato da strutture tradizionali.

Il lungo processo culturale che porta alla maggiore consapevolezza del valore dei caratteri tecnico costruttivi del patrimonio architettonico storico, con la conseguente riflessione relativa alle modalità di miglioramento sismico dello stesso, prende avvio solo negli anni ottanta del secolo scorso. La ripresa degli studi della manualistica e delle tecniche

63 C. Bartolomucci, *La dialettica tra... op. cit.*, p. 684.

64 Soprintendente all'Arte Medievale e Moderna per l'Abruzzo e il Molise dal '42, Chierici portò avanti un intervento a Palazzo Carli Benedetti finalizzato a ripristinare l'aspetto quattrocentesco del cortile. C. Bartolomucci, *La dialettica tra... op. cit.*

65 C. Galli, *Precedenti storici e orientamenti della normativa sismica dei beni culturali. Regole dell'arte, intuizione e calcolo numerico*, XV Convegno ANIDIS, *L'ingegneria sismica in Italia*, Padova, 2013, p. 5.

66 *Idem*, p. 5.

67 Ministero dei Beni Culturali e Ambientali, Circolare 18/07/1986, n. 1032, Interventi sul patrimonio monumentale a tipologia specialistica in zone sismiche, raccomandazioni.

68 C. Galli, *Precedenti storici... op. cit.*, p. 6.

69 Per approfondimenti: G. Carbonara, *Introduzione alle Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale*, a cura di Laura Moro, Gangemi, Roma, 2006; A. Giuffrè, *Sicurezza e Conservazione dei centri storici. Il caso di Ortigia, Laterza, Bari-Roma, 1993.*

storiche, degli antichi magisteri costruttivi, consente di indagare il reale comportamento meccanico delle fabbriche murarie, senza più ricorrere agli schemi resistenti propri dei moderni materiali. L'attività del Comitato Nazionale per la prevenzione del patrimonio culturale dal rischio sismico, coordinato da Romeo Ballardini, costituisce "*la base del ragionamento tecnico-culturale circa l'intervento di miglioramento sismico e le attuali normative*"⁶⁵. Gli studi di natura prevalentemente teorica e storica portati avanti da Salvatore Di Pasquale ed Edoardo Benvenuto e i contributi più pragmatici di Antonino Giuffrè, a cui si deve l'introduzione dell'analisi del comportamento sismico delle fabbriche murarie tramite l'individuazione di meccanismi di danno "*ripetitivi e generalizzabili*"⁶⁶, individuano una *linea di comportamento*, esposta nella circolare Ballardini dell'86⁶⁷, i cui contenuti si basano su quattro criteri fondamentali, "*che costituiscono ancora oggi un atteggiamento pienamente condiviso: attenzione ai materiali e ai magisteri originali; ricostruzione della storia sismica del manufatto, evidenziando le riparazioni seguite ad eventi sismici; rigoroso approccio interdisciplinare in tutte le fasi progettuali, con il contributo di apporti architettonici, storici, geotecnici, strutturali e impiantistici; infine raccomandazione al «ricorso a tecniche e materiali il più possibile vicini agli originali con severo esame interdisciplinare di eventuali interventi difformi dai suddetti»*"^{68, 69}.

Per oltre un cinquantennio, senza che il parallelo sviluppo delle teorie espone portasse a ripensamenti

metodologici, gli interventi di restauro nella città de L'Aquila si sono susseguiti in continuità, senza comprendere che l'architettura storica “è stata progettata con l'intento di trasmettere un messaggio al futuro, e l'architetto è stato libero di inserire nel discorso l'ultima conquista della sua conoscenza. [...] Noi dobbiamo decifrarlo”⁷⁰.

2.6 La chiesa come palinsesto costruttivo

Il tessuto urbano del centro storico aquilano si configura come una fitta trama di impianto medievale, intervallata da spazi urbani caratterizzati dalla presenza di edifici religiosi. Durante il XIII secolo, si assiste al trasferimento in città⁷¹ di diversi ordini religiosi che affermano la loro presenza con la costruzione delle loro sedi che, ancora oggi, caratterizzano fortemente il tessuto cittadino. Tutte le principali cartografie storiche riportano un gran numero di edifici religiosi, rappresentati con un elevato grado di dettaglio; per citare un dato eloquente circa la massiccia presenza ecclesiastica sul territorio, basti pensare che nella prima Pianta de L'Aquila del Fonticulano, risalente al 1575, su centodiciannove edifici a tipologia specialistica numerati, solo quattro non hanno destinazione religiosa; il rapporto è di sei su centoventiquattro nella Pianta del Vandi del 1753 (fig. 2.23)⁷². Le nuove chiese di locale e specialmente di quarto rappresentano, quindi, “punti di coagulo per la costruzione della piazza”⁷³; con l'avvento dell'epoca mercantile e la realizzazione dei primi

70 A. Giuffrè, *Leggere il libro delle antiche architetture*, Gangemi, Roma, 2011, p. 33.

71 Clementi e Piroddi sottolineano l'importante presenza di francescani, domenicani, eremitani, cistercensi e benedettini. A. Clementi, E. Piroddi, *L'Aquila... op. cit.*

72 Per approfondimenti: *Idem*, Capitolo 8.

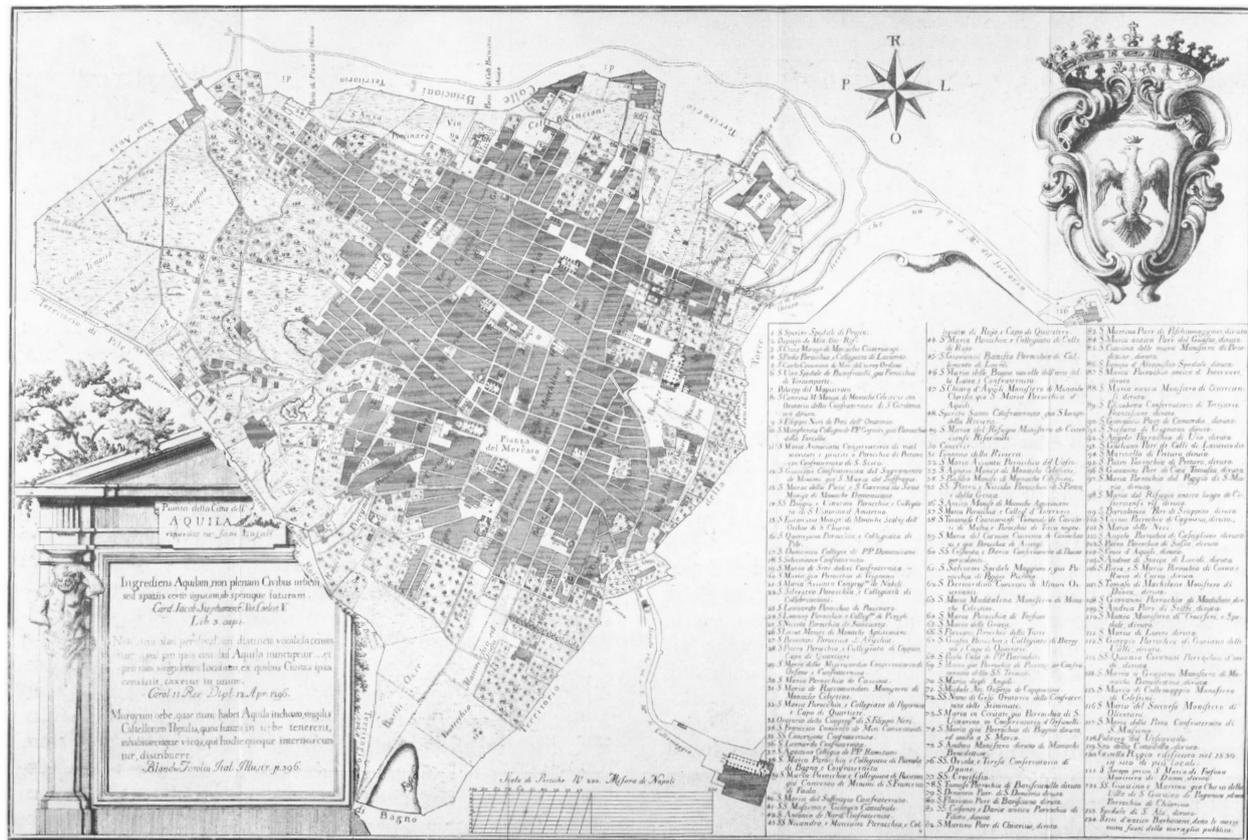
73 L. Zordan, *Tecniche costruttive dell'edilizia Aquilana*, in M. Centofanti, R. Colapietra, C. Conforti, P. Properzi, L. Zordan, *L'Aquila città di piazze. Spazi urbani e tecniche costruttive*, Carsa, Pescara, 1992, p. 96.

1. S. Spirito Spedale di Progeni.	44. S. Maria Pavocchia e Collegata di Colle di Rojo.	83. S. Martino Parr. di Risthomygiano diruta.
2. Ospizio di San Onofrey.	45. S. Giovanni Battista Parrocchia di Colimento di Lucoli.	84. S. Maria antica Parr. del Guasto diruta.
3. S. Croce Monaci di Monache Cisterciensi.	46. S. Maria delle Bugne novelle dell'aria della Luna e Confraternita.	85. S. Caterina delle mura Monistero di Beadedice diruta.
4. S. Paolo Parrocchia e Collegata di Lavanto.	47. S. Chiara d'Aguli Monistero di Monache Clarisse gia S. Maria Parrocchia d'Aguli.	86. S. Ippolito d'Altopascio Spedale diruta.
5. S. Carlo Convento di Mon del uero Ordine.	48. Spirito Santo Confraternita gia S. Angelo della Riviera.	87. S. Maria nuova Monistero di Cisterciensi diruta.
6. S. Uro Spedale di Buonvittelli, gia Parrocchia di Torinoparte.	49. S. Maria del Refugio Monistero di Cisterciensi Riformati.	88. S. Elisabetta Confraternita di Terziarie Francescane diruta.
7. Palazzo del Magistrato.	50. Concesa di Rocca della Riviera.	89. S. Giovanni Parr. di Camarda diruta.
8. S. Caterina M. Monaci di Monache Celestine con Oratorio della Confraternita di S. Giuliano in diruta.	51. Concesa della Riviera.	90. S. Stefano di Cugnano diruta.
9. S. Filippo Neri di Prati dell'Oratorio.	52. S. Maria Assunta Parrocchia del Uolivo.	91. S. Angelo Parrocchia di Uro diruta.
10. S. Margherita Collegio di PP. Gesuiti, gia Parrocchia della Rocella.	53. S. Agnese Monaci di Monache Celestine.	92. S. Giuliano Parr. di Colli di Lavanto diruta.
11. S. Maria Annunziata Confraternita di ual montate e prioste e Parrocchia di Petruo con Confraternita di S. Sisto.	54. S. Paolo Monaci di Monache Celestine.	93. S. Marcella di Petruo diruta.
12. S. Giuseppe Confraternita del Sacramento di Minami, gia S. Maria del Suffraganeo.	55. S. S. Pietro e Niccolo Parrocchia di S. Pietro e della Genca.	94. S. Pietro Parrocchia di Petruo diruta.
13. S. Maria della Pietà e S. Caterina da Siena Monaci di Monache Domenicane.	56. S. Amico Monaci di Monache Agostiniane.	95. S. Giovanni Parr. di Casa Tomassa diruta.
14. S. S. Biagio e Uorino Parrocchia e Collegata di S. Uorino d'Ameterio.	57. S. Maria Pavocchia e Colleg. d'Intervetere.	96. S. Maria Parrocchia del Poggio di S. Maria diruta.
15. S. Eusebio Monaci di Monache Scalz dell'Ordine di S. Chiara.	58. S. Tommaso Cantuariensi Comanda di Cavaleri di Molta e Parrocchia di Tera nigra.	97. S. Maria del Refugio antico luogo de Cisterciensi rif. diruta.
16. S. Quinziano Parrocchia e Collegata di Tole.	59. S. Maria del Carmine Convento di Carmelitan e gia Parrocchia di Assergi.	98. S. Bartolomeo Parr. di Scoppito diruta.
17. S. Domenico Collegio di PP. Domenicani.	60. S. S. Crisostomo e Dario Confraternita di Donne periculanti.	99. S. Cosmo Parrocchia di Cugnano diruta.
18. S. Sebastiano Confraternita.	61. S. Salvatore Spedale Maggiore e gia Parrocchia di Poggio Picerno.	100. S. Maria delle Neri.
19. S. Maria de S. S. Ippolito Confraternita.	62. S. Bernardino Convento di Minori Osservanti.	101. S. Angelo Parrocchia di Castiglione diruta.
20. S. Maria Assunta Confraternita di Nobili.	63. S. Maria Maddalena Monistero di Monache Celestine.	102. S. Pietro Parrocchia di Sassa diruta.
21. S. Silvestro Parrocchia e Collegata di Collebriacione.	64. S. Maria Pavocchia di Forbone.	103. S. Croce d'Aguli diruta.
22. S. Leonardo Parrocchia di Pinciano.	65. S. Maria delle Grazie.	104. S. Andrea e S. Maria Parrocchia di Corva e Rocca di Corva diruta.
23. S. Lorenzo Parrocchia e Colleg. di Perigli.	66. S. Flaviano Parrocchia della Torre.	105. S. Tomaso di Marbilene Monistero di Donne diruta.
24. S. Nicolo Parrocchia di Sant'Agata.	67. S. Giustina Parrocchia e Collegata di Borgo uo e Capo di Quartiere.	106. S. Giovanni Parrocchia di Maddalena diruta.
25. S. Lucia Monaci di Monache Agostiniane.	68. S. Paolo Casa di PP. Barnabiti.	107. S. Andrea Parr. di Sufte diruta.
26. S. Benedetto Parrocchia di Aricchia.	69. S. Maria gia Parrocchia di Petruo, ar Casua teruata della S. S. Trinita.	108. S. Matteo Monistero di Craciferi e Spedale diruta.
27. S. Pietro Parrocchia e Collegata di Capparo Capo di Quartiere.	70. S. Maria degli Angeli.	109. S. Maria di Luoro diruta.
28. S. Maria delle Miracordia Confraternita di Orfani e Confraternita.	71. S. Michele Arc. Ospizio di Cappuzini.	110. S. Giorgio Parrocchia di Corvano delle Ualle diruta.
29. S. Maria Parrocchia di Cascina.	72. S. S. Nome di Gesu Oratorio della Confraternita delle Scimmiate.	111. S. Quirico Coronati Parrocchia d'and. diruta.
30. S. Maria de Rucomandanti Monistero di Monache Celestine.	73. S. Maria in Civitate, gia Parrocchia di S. Uisariano, in Confraternita d'Orfanelli.	112. S. Maria a Graziano Monistero di Monache Benedettine diruta.
31. S. Maria Parrocchia e Collegata di Paganica e Capo di Quartiere.	74. S. Maria gia Parrocchia di Bigno diruta ed unita a S. Marco.	113. S. Maria di Collemaggio Monistero di Celestini.
32. S. Maria Parrocchia e Collegata di Paganica e Capo di Quartiere.	75. S. Andrea Monistero diruta di Monache Benedettine.	114. S. Maria del Soccorso Monistero di Uisitariani.
33. Oratorio della Congreg. di S. Filippo Neri.	76. S. S. Orsola e Teresa Confraternita di Donne.	115. S. Maria della Pata Confraternita di S. Maurizio.
34. S. Francesco Convento di Min. Conventuali.	77. S. S. Crocifisso.	116. Palazzo del Uiseguado.
35. S. Concione Confraternita.	78. S. Tomaso Parrocchia di Barficanello diruta.	117. S. Maria della Cattedrale diruta.
36. S. Leonardo Confraternita.	79. S. Demetrio Parr. di S. Domenico diruta.	118. Castello R. ego edificato nel 1530. in suo di piu locali.
37. S. Agostino Collegio di PP. Romitani.	80. S. Flaviano Parr. di Barficanello diruta.	119. S. Ippolito presso S. Maria di Fesona Monistero di Donne diruta.
38. S. Marco Parrocchia e Collegata di Parnola di Bagno e Confraternita.	81. S. S. Costanzo e Daria antica Parrocchia di Pico diruta.	120. S. Cusimino e Marino, gia Chiesa della Villa di S. Giovanni di Paganica ed ora Parrocchia di Chiarino.
39. S. Maria Parrocchia e Collegata di Rusciano, gia Convento di Minami di S. Francesco di Paola.	82. S. Martino Parr. di Chiarino diruta.	121. S. Spirito di S. Ato diruta.
40. S. Maria del Suffraganeo Confraternita.		122. S. Maria di S. Ato diruta.
41. S. S. Massimo e Giorgio Cattedrale.		123. S. Spirito di S. Ato diruta.
42. S. Antonio di Nardi Confraternita.		124. S. Maria Parr. di Chiarino diruta.
43. S. Nicandro e Marcellino Parrocchia e Collegata di...		

Fig. 2.23, La pianta del Vandi, caratterizzata da una spiccata "esattezza della ricostruzione topografica dei tracciati e del perimetro murario". A. Clementi, E. Piroddi, L'Aquila... op. cit., p. 135.

Nella pagina a fianco: Fig. 2.24, Localizzazione degli edifici religiosi nel centro storico identificati da Le Chiese delle Diocesi Italiane. Elaborato dall'autore.

https://chieseitaliane.chiesacattolica.it/chieseitaliane/ricercaA.jsp, base cartografica: http://geoportale.regione.abruzzo.it/Cartanet



L'Aquila 1:7'500



200 m

74 Per approfondimenti: A. Clementi, E. Piroddi, *L'Aquila... op. cit.*, Capitolo 6.

75 A. Clementi, E. Piroddi, *L'Aquila... op. cit.*, p. 139.

76 L. Zordan, *Tecniche costruttive... op. cit.*, p. 96.

77 A. Clementi, E. Piroddi, *L'Aquila... op. cit.*, p. 41.

78 *Idem*, p. 41.

Nella pagina a fianco: Fig. 2.25, I principali sistemi Piazza-Chiesa-Palazzo nel centro storico de L'Aquila. Elaborato dell'autore, base cartografica: <http://geoportale.regione.abruzzo.it/Cartanet>.

- 1 Chiesa di San Silvestro e Palazzo Branconi
- 2 Chiesa di San Pietro di Coppito e Palazzo Porcinari
- 3 Chiesa di Santa Maria Paganica e Palazzo Ardinghelli
- 4 Chiesa dell'Annunziata e Palazzo Carli
- 5 Chiesa di Santa Margherita, Palazzo Pica Alfieri e Palazzetto dei Nobili
- 6 Chiesa di Santa Maria di Roio, Palazzo Rivera e Palazzo Persichetti
- 7 Chiesa dei Santi Marciano e Nicandro e Palazzo Rustici
- 8 Chiesa di Santa Giusta e Palazzo Centi

- Costruito
- Piazza

palazzi commissionati dalle grandi famiglie nobiliari⁷⁴, gli spazi urbani si arricchiscono ulteriormente qualificandosi per il “*dualismo chiesa-palazzo*”⁷⁵ (fig. 2.25), vere e proprie polarità all'interno dei quartieri.

Tra il XIII e il XIV secolo si consolida la tipologia edilizia ecclesiale riferibile alla cosiddetta “*scuola aquilana*”⁷⁶, la cui diffusione non è limitata al centro storico. Due sono gli elementi architettonici che maggiormente caratterizzano tali fabbriche: l'aula ad impianto rettangolare, che ne connota la spazialità, e la facciata che si configura come corpo aggiunto, anch'esso di forma quadrangolare, che ne definisce, invece, il rapporto con lo spazio antistante, consentendo di aprire un “*dialogo autonomo con lo spazio urbano*”⁷⁷.

Il prospetto principale, la cui importanza architettonica è stata già sottolineata, appare compositivamente e strutturalmente svincolato dalla chiesa retrostante: la *lastra*, come definita dalla bibliografia, realizzata prevalentemente con blocchi squadrati di notevoli dimensioni di pietra calcarea dalla caratteristica colorazione bianca e rosa, presenta un'altezza maggiore rispetto alla trave di colmo interna, celando così la configurazione strutturale della fabbrica e privilegiando la soluzione figurativa. Sono inoltre presenti elementi ricorrenti, che donano alla città una “*assoluta peculiarità*”⁷⁸: il portale e il rosone con paramento decorativo in pietra e, spesso, accompagnati da un sottile marcapiano (fig. 2.27).

L'abside si contrappone spazialmente, tecnicamente e

L'Aquila 1:7'500



200 m

79 Paramento realizzato da conci in pietra calcarea di modeste dimensioni, circa tra i 10 e i 12 cm, disposti a corsi orizzontali faccia a vista; morfologicamente, l'apparecchio rimanda ai più antichi *opus reticulatum* e *opus vittatum* e, probabilmente, la sua diffusione in territorio abruzzese si deve ai benedettini. Il primo a definire l'apparecchio, le cui peculiarità sono ormai ampiamente riconosciute, fu Gavini nel suo *Storia dell'Architettura in Abruzzo*, Bestetti e Tumminelli, Milano-Roma, 1927. S. Brusaporci, *Il disegno dell'apparecchio aquilano nell'architettura religiosa dal XII al XIV secolo*, in R. M. Strollo (a cura di), *Disegno e conoscenza: contributi per la storia e l'architettura*, Aracne, Roma, 2006, pp. 75-92.

80 L. Zordan, *Tecniche costruttive...* op. cit., p. 103.

81 *Idem*, p. 100.

compositivamente alla facciata: spesso caratterizzata da una struttura triconica, in contrasto con la linearità della facciata, prevede l'uso sistematico di grandi blocchi che svolgono l'importante funzione strutturale di risolvere gli elementi più vulnerabili, come cantonali e campanili, l'abside è

I prospetti laterali, caratterizzati da un ridotto numero di aperture, sono realizzati con il tipico "*apparecchio aquilano*"⁷⁹: in questo caso, "*all'uso di una tecnologia povera è affidato il compito di evidenziare una gerarchia di valori formali tra le diverse fronti della chiesa*"⁸⁰.

L'evoluzione tipologica di tali strutture viene chiaramente sintetizzata da Antonini, uno dei principali studiosi dell'edilizia religiosa aquilana, i cui disegni raffigurano la trasformazione della chiesa "*attraverso la sostituzione per parti*"⁸¹, distinguendo poi i due principali impianti planimetrici, ad aula unica o a tre navate, con le differenti tipologie di facciate (fig. 2.28).

Oltre le trasformazioni che interessarono le fabbriche religiose durante il XVI secolo, che introdussero impianti gesuitici, caratterizzati dalla presenza di cappelle laterali, adeguando così gli edifici di culto ai nuovi dettami post-tridentini, i maggiori cambiamenti vennero introdotti durante la ricostruzione settecentesca.

Come già accennato, il terremoto del 1703 distrusse la città e la ricostruzione dell'edilizia religiosa sconvolse

ed innovò il linguaggio preesistente: i nuovi canoni barocchi, spaziali e figurativi, introducono in città una nuova tipologia, caratterizzata da impianti planimetrici centrali ellittici, importati dagli architetti provenienti da Roma, e dalle esuberanti facciate barocche, che movimentano i rigidi spazi, instaurando con essi un nuovo dialogo. Tra gli interventi condotti a seguito del terremoto, alcuni prevedono il totale rifacimento degli edifici, ricostruiti in maniera dichiaratamente moderna, come le chiese di Sant'Agostino, Santa Caterina, Santa Maria del Suffragio e della Concezione; altre, invece, furono solo rivisitate per l'adeguamento ai nuovi canoni, nonostante il terremoto le avesse parzialmente risparmiate, come la Basilica di Collemaggio e la chiesa di Santa Maria Paganica.

In conclusione, tra i diversi fattori comuni agli edifici religiosi è possibile evidenziarne uno non di carattere spaziale né figurativo ma tecnico-costruttivo: soggette a continui rinnovamenti, a causa dei danni provocati da eventi sismici e, nel caso di quelli avvenuti fino alla fine del secolo scorso, frutto di controverse operazioni di restauro, le fabbriche religiose sono il risultato di processi di stratificazione molto complessi che introducono una evidente frammentazione costruttiva, non senza conseguenze nella stabilità degli organismi. Il palinsesto di tecniche costruttive che le chiese presentano rappresenta d'altro canto un'interessante e ricca fonte di conoscenza, a cui solo un paziente osservatore può attingere.

Nella pagina successiva: Fig. 2.26, Maestro Di San Giovanni Da Capestrano, *Predica all'Aquila. Predica di San Giovanni da Capestrano*, 1490. Museo Nazionale d'Abruzzo, L'Aquila. L. Zordan, *Tecniche costruttive... op. cit.*, p. 33.



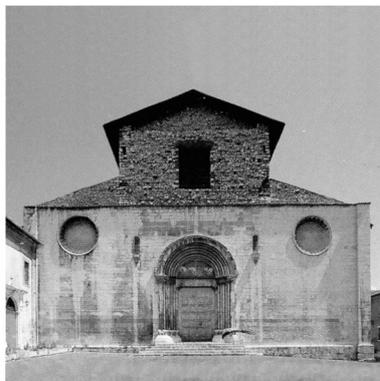
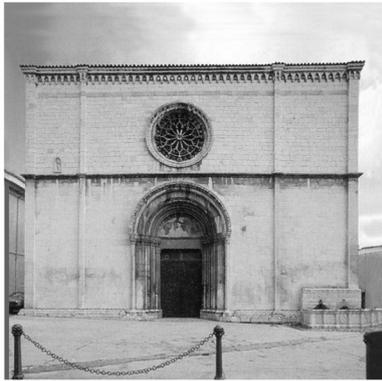
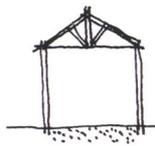
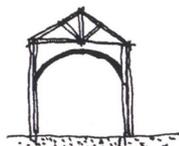


Fig. 2.27. In ordine: San Silvestro, Santa Giusta, Santi Marciano e Nicandro, Santa Maria degli Angeli, San Bernardino, San Pietro di Coppito, San Vito della Rivera, Basilica di Collemaggio, Santa Maria di Roio con il prospetto caratteristico della *scuola aquilana*, maggiormente elaborato nel caso della Basilica di San Bernardino. Santa Maria della Misericordia, San Domenico e Santa Caterina presentano i tratti propri dell'evoluzione tipologica descritti da Zordan. L. Zordan, *Tecniche costruttive... op. cit.*, pp. 96-97.



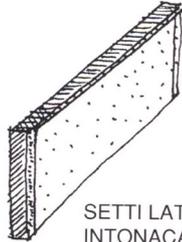
CAPRIATA IN LEGNO A VISTA



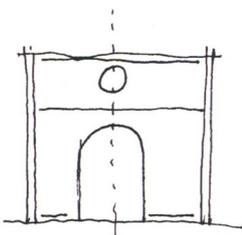
VOLTA A STUCCO



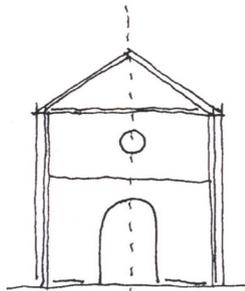
SETTI LATERALI IN "APPARECCHIO AQUILANO"



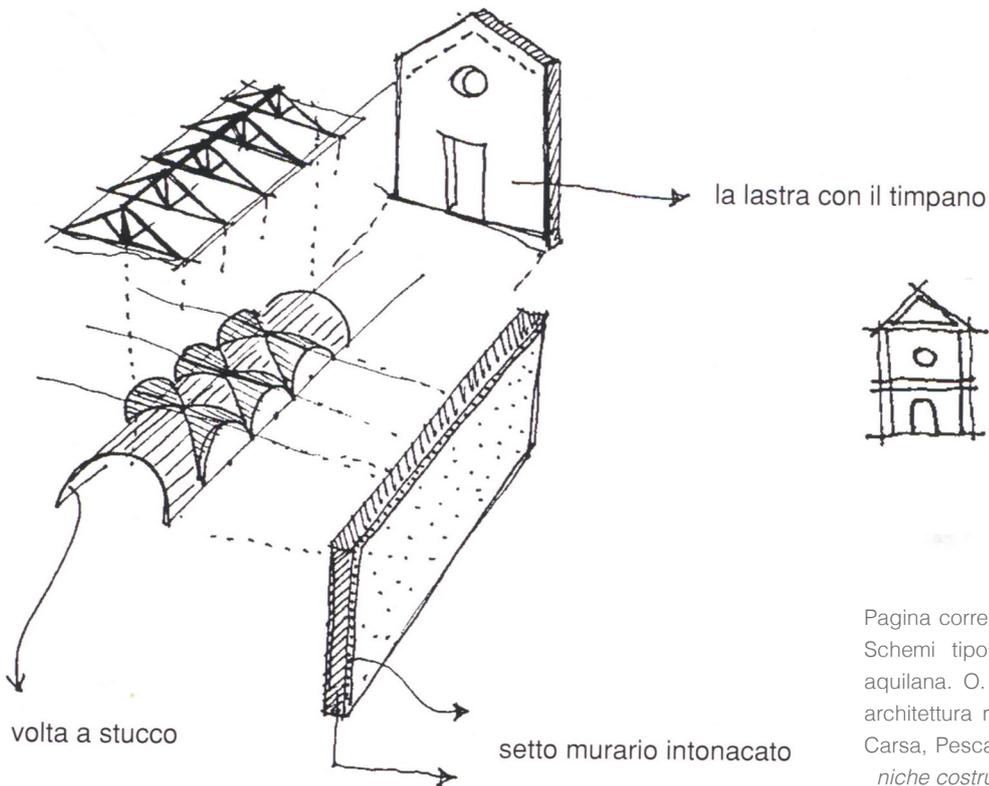
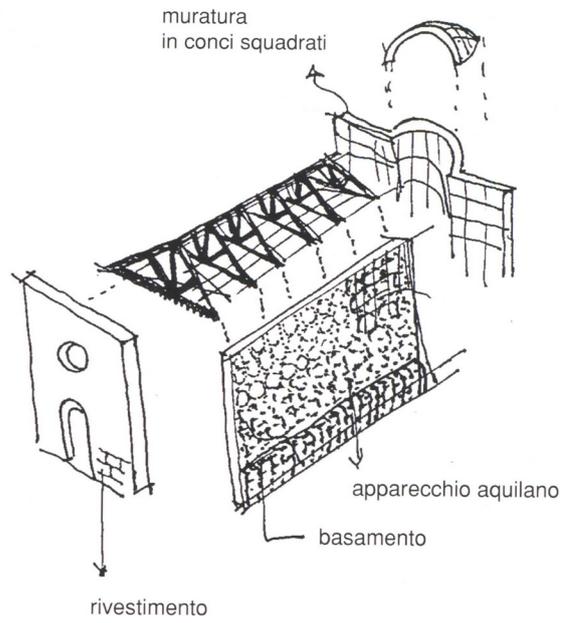
SETTI LATERALI INTONACATI



LA LASTRA



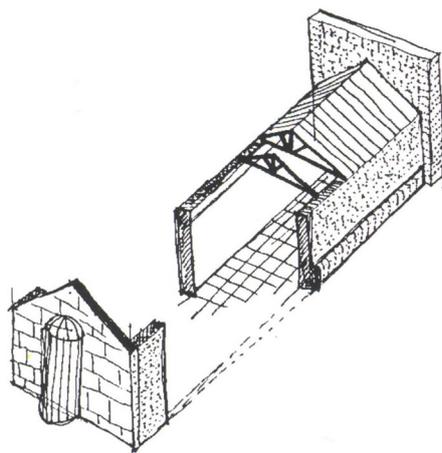
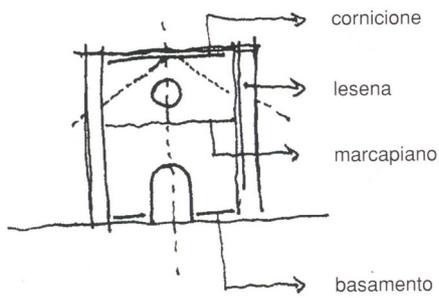
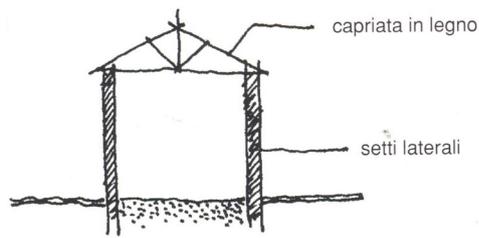
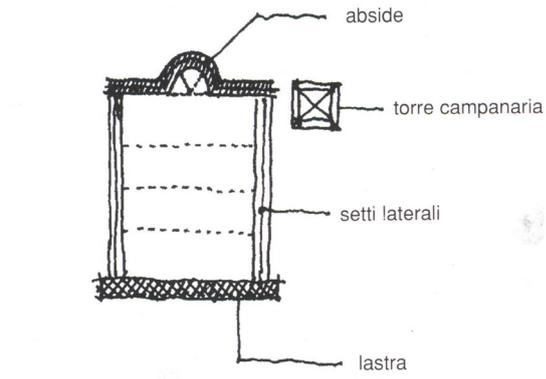
LA LASTRA CON IL TIMPANO



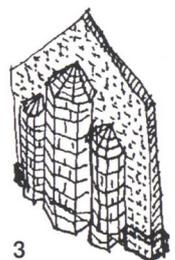
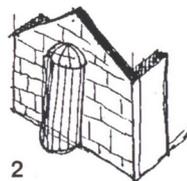
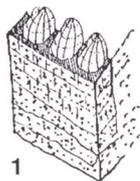
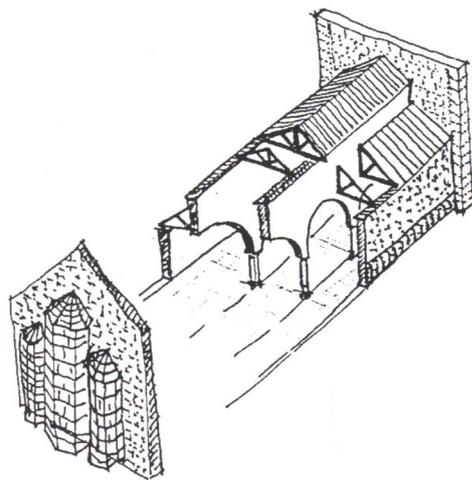
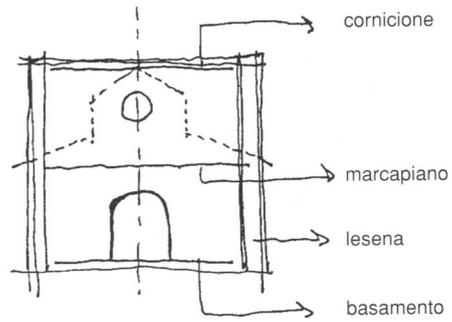
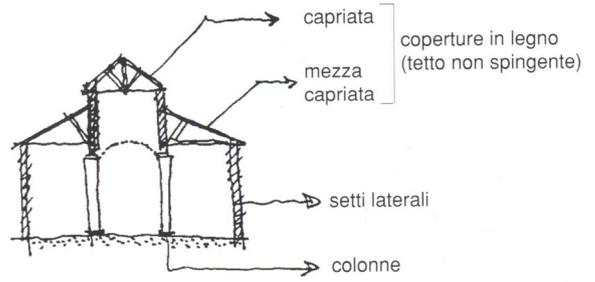
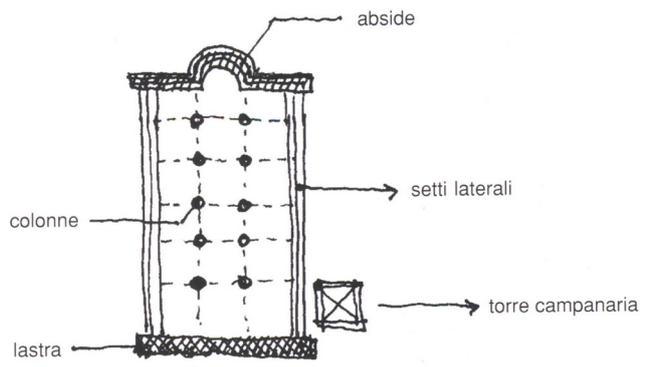
- sono ancora presenti:
1. marcapiano;
 2. lesene;
 3. basamento;
 4. cornicione

Pagina corrente e successiva: Fig. 2.28, Schemi tipologici dell'edilizia religiosa aquilana. O. Antonini, Chiese dell'Aquila: architettura religiosa e struttura urbana, Carsa, Pescara, 2004 in L. Zordan, *Tecniche costruttive... op. cit.*, pp. 100-101.

A. AULA UNICA

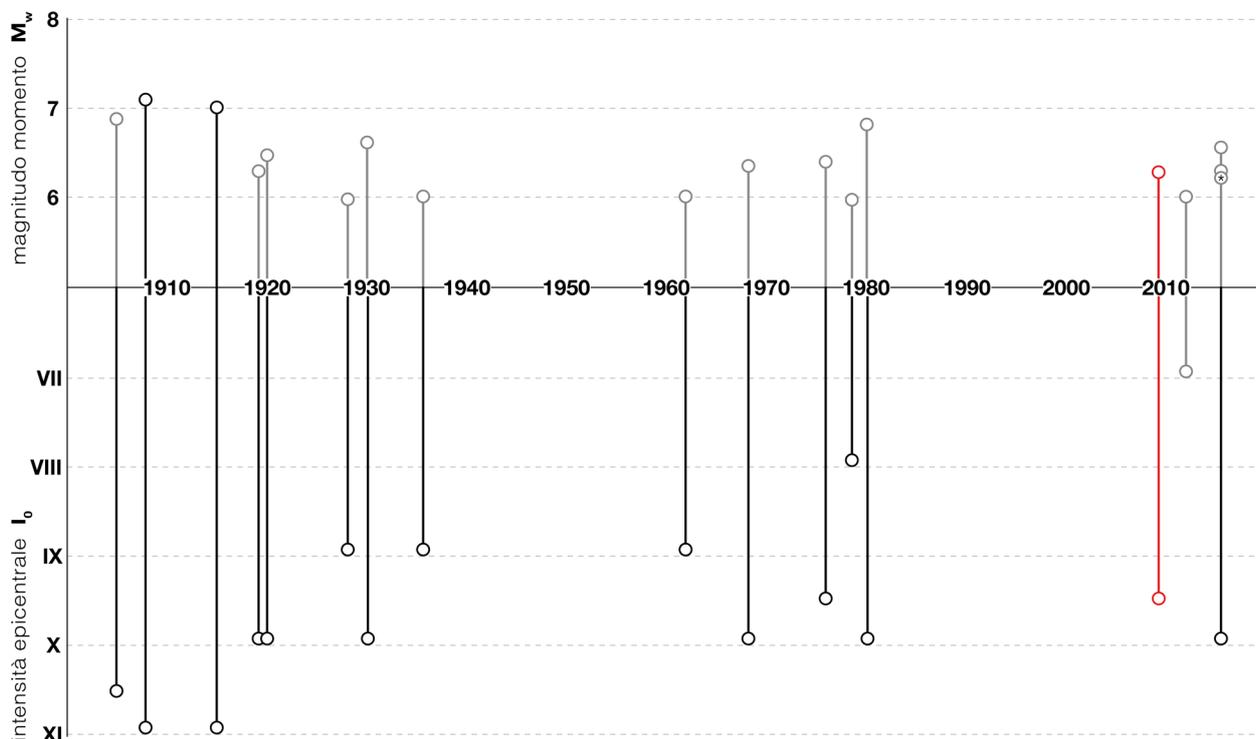


B. A TRE NAVATE



Eventi sismici dall'anno 1900 nell'area nazionale ($M_w > 6.0$)

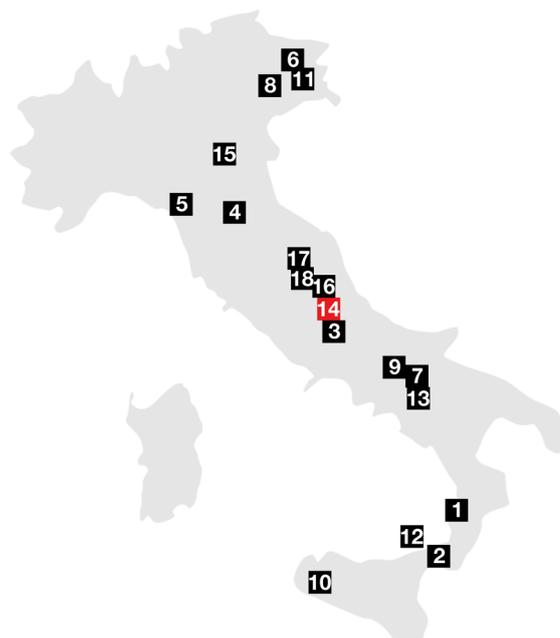
aggiornato al 2020 ¹



Rielaborazione dell'autore del grafico riportato sul sito del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15). https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/query_eq/, u.c. gennaio 2024.

♀ $M_w > 7.0$ ♀ $I_0 \geq VIII$ * i dati relativi all'intensità epicentrale dei terremoti non sono riportati sul sito dell'INGV.
 ♀ $6.0 < M_w \leq 7.0$ ♀ $VI \leq I_0 \leq VII$

	Data	Area epicentrale	I_0	M_w
1	08.09.1905	Calabria centrale	X-XI	6.95
2	28.12.1908	Stretto di Messina	XI	7.10
3	13.01.1915	Marsica	XI	7.08
4	29.06.1919	Mugello	X	6.38
5	07.09.1920	Garfagnana	X	6.53
6	27.03.1928	Carnia	IX	6.02
7	23.07.1930	Irpinia	X	6.67
8	18.10.1936	Alpago Cansiglio	IX	6.06
9	21.08.1962	Irpinia	IX	6.15
10	15.01.1968	Valle del Belice	X	6.41
11	06.05.1976	Friuli	IX-X	6.45
12	15.04.1978	Golfo di Patti	VIII	6.03
13	23.11.1980	Irpinia-Basilicata	X	6.81
14	06.04.2009	Aquilano	IX-X	6.29
15	20.05.2012	Pianura emiliana	VII	6.09
16	24.08.2016	Monti della Laga	X	6.18
17	26.10.2016	Valnerina	-	6.07
18	30.10.2016	Valnerina	-	6.61



¹ Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15). https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/query_eq/, u.c. gennaio 2024.

Glossario¹

La **magnitudo** misura “l'energia totale rilasciata durante un terremoto e si calcola attraverso l'ampiezza delle oscillazioni del terreno provocate dal passaggio delle onde sismiche, registrate dai sismometri [...]. Il più forte terremoto mai registrato è quello del Cile del 1960 di magnitudo 9.5 (sebbene non ci sia alcun limite teorico alla stima della magnitudo). Ogni unità di magnitudo rappresenta un aumento di 32 volte l'energia rilasciata dalla faglia. Quindi, un terremoto di magnitudo 7 ha 32 volte più energia di un terremoto di magnitudo 6 [...]. Esistono varie tipologie di magnitudo, ognuna basata sull'analisi delle onde sismiche in un diverso intervallo di frequenza”.

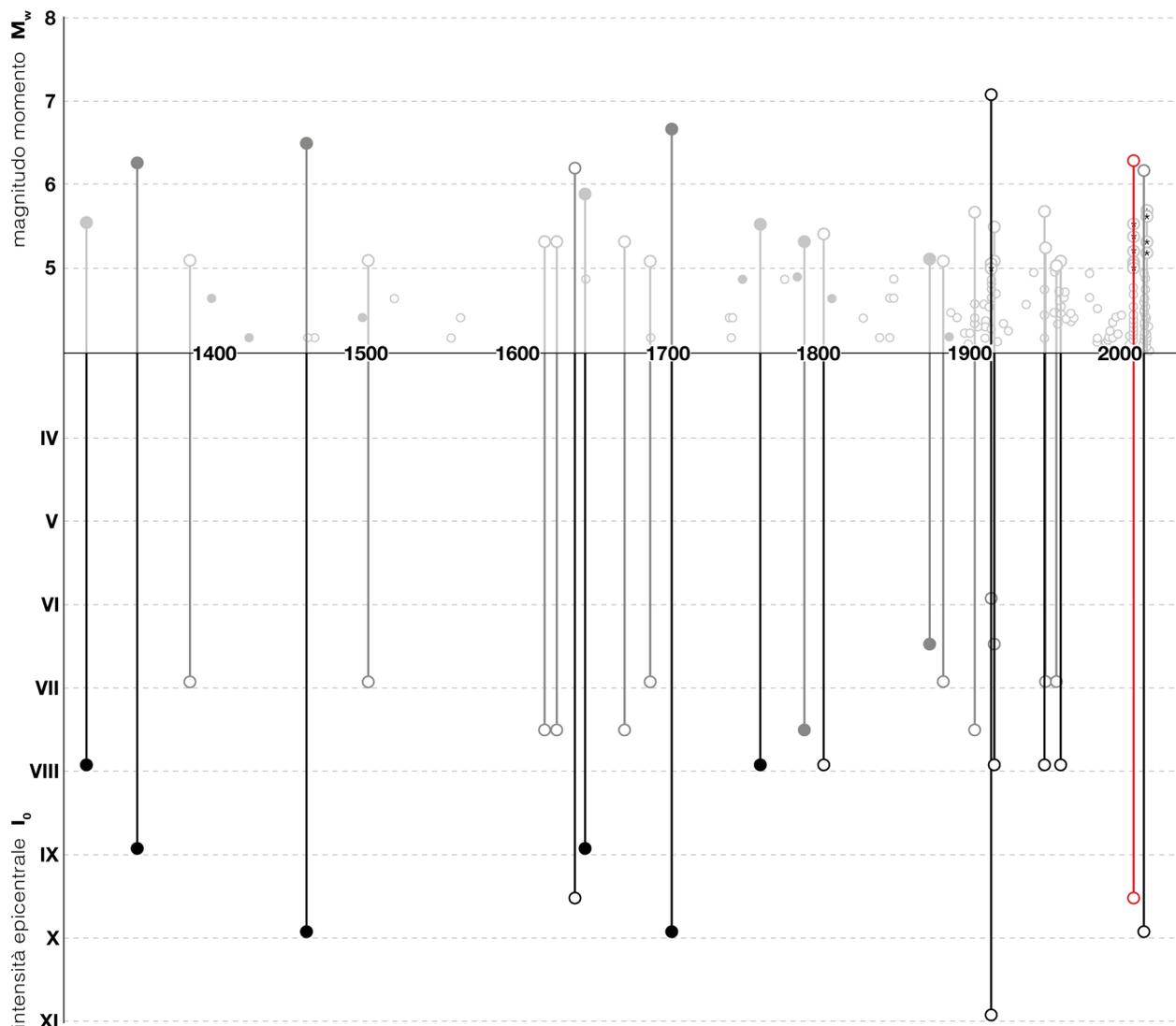
In particolare, il valore qui riportato come M_w rappresenta la **magnitudo momento**; essa “si calcola sull'intero sismogramma ed è più rappresentativa della grandezza del terremoto [rispetto agli altri valori di magnitudo]; infatti si ottiene a partire dalla stima delle caratteristiche geometriche della faglia, ovvero della sua superficie totale e dello scorrimento lungo il piano di faglia”.

L'**intensità** “misura gli effetti di un terremoto sulle costruzioni, sull'uomo e sull'ambiente, classificandoli in dodici gradi attraverso la scala Mercalli, dal nome del sismologo italiano che, all'inizio del XX secolo, diffuse a livello internazionale la classificazione dei terremoti secondo gli effetti e i danni che producevano: più alto il grado, più disastroso il terremoto. Questa scala è stata successivamente modificata da Cancani e Sieber. Per stimare l'intensità di un terremoto bisogna osservare e valutare gli effetti che esso ha causato in tutta l'area interessata. Per questo squadre di tecnici specializzati compiono ricognizioni nella zona colpita da un terremoto e raccolgono dati per realizzare le mappe macrosismiche con l'indicazione dell'intensità del sisma nelle diverse località colpite, [...] l'intensità può cambiare da luogo a luogo [...]; in genere, più ci si allontana dall'epicentro e più diminuisce”.

Per **intensità epicentrale** si intende, quindi, il valore di intensità nel punto corrispondente all'epicentro del terremoto.

¹ <https://ingvterremoti.com/glossario/>, u.c. gennaio 2024.

Eventi sismici dall'anno 1301 nell'area compresa entro 50 km da L'Aquila ($M_w > 3.9$) aggiornato al 2020¹



Rielaborazione dell'autore del grafico riportato sul sito del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15). https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/query_eq/, u.c. gennaio 2024.

- $M_w > 7.0$
- $6.0 < M_w \leq 7.0$
- $5.0 < M_w \leq 6.0$
- $3.9 < M_w \leq 5.0$
- $I_0 \geq VIII$
- $VI \leq I_0 \leq VII$
- $IV \leq I_0 \leq V$
- Eventi sismici citati in M. Baratta, *op. cit.*
- Terremoto 06.04.2009
- * i dati relativi all'intensità epicentrale dei terremoti non sono riportati sul sito dell'INGV.
- n.b.: i dati relativi all'intensità epicentrale sono riportati solo per i terremoti con $M_w \geq 5.0$.

“Fra le città dell'Italia centrale Aquila fu certamente quella che soggiacque alle maggiori rovine causate dai parossismi endogeni. Nel secolo XIV due grandi catastrofi colpiscono la città negli anni 1315 e 1349: minori furono i danni causati dallo scuotimento del 1398; nel secolo XV gran parte venne adeguata al suolo nell'anno 1456 ed ancora poi nel 1461: qualche lesione risentirono i suoi edifici nel 1423 e nel 1498. Il secolo XVI non ricorda alcun parossismo: riguardo al XVII troviamo nel 1646 un nuovo terremoto che causò qualche danno: nel XVIII abbiamo anzitutto la grande catastrofe del 1703, i parossismi minori del 1786 e del 1791 e gli altri ancora meno violenti del 1750 e del 1762. Nel secolo attuale i danni causati da terremoti furono lievi e poco frequenti (1803, 1809, 1874, 1887).”²

¹ Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI15). https://emidius.mi.ingv.it/ASMI/event/20090406_0132_000?page=2, u.c. gennaio 2024.

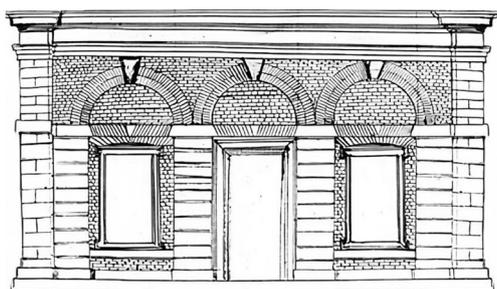
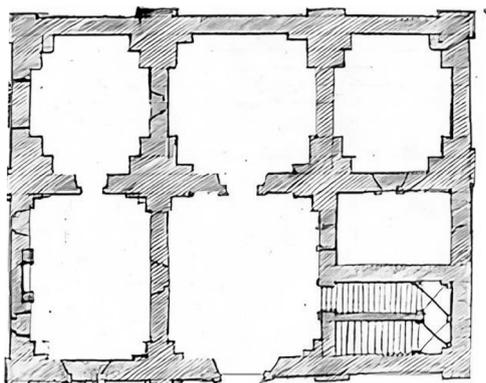
² M. Baratta, *I terremoti in Italia*, Ristampa anastatica, «Katastróphé», collana diretta da L. Mercalli, Volume II, Mimesis, Milano-Udine, 2020, p. 767.

Pirro Ligorio e il primo prototipo di *casa antisismica*

Pur aderendo alla più diffusa convinzione secondo la quale il terremoto è parte di un disegno provvidenziale, Ligorio¹ dimostra nel suo trattato uno spiccato senso critico riguardo le coeve teorie sull'origine dei terremoti, manifestando una più matura visione del fenomeno. Sostenendo che gli eventi sismici *“non sono condizionati da coincidenze «esterne», rispetto all'interno terrestre”*², Ligorio definisce gli astrologi del suo tempo come *“scioccarelli [che], non considerando le loro muffagini, hanno dette cose degne della loro propria temeraria presunzione”*³, imbrattando la *scienza colla magia*.

*“Havendo concesso Iddio a l'huomo l'essere rationale et ragionevole et havere il libero arbitrio per sua guida, et di necessità anchora che l'huomo debba ricorrere alle ragioni, et nel libero arbitrio prendere quello che è buono et utile et quello nel potersi salvare. [...] mi pare che si debba procedere colle cose regolari nel provvedersi, se provvedere si puote, contra le forze de' terremoti, per recarsi sicuri nelli alberghi et per vietare in parte alcuni pericoli.”*⁴

Forte della sua visione razionale, la cui contrapposizione con la religiosità emerge con forza dalle parole del trattato, Ligorio legittima la ricerca di innovativi sistemi costruttivi per salvaguardarsi dalle funeste forze sismiche e, dopo una disamina delle soluzioni proposte dagli antichi, formula quello che può essere considerato il primo prototipo di *casa antisismica*.



Progetto di casa antisismica. E. Guidoboni (a cura di), *Pirro Ligorio... op. cit.*, p. 95.

L'impianto è caratterizzato da forti principi di regolarità e simmetria, sia in pianta che in alzato, con spessi setti murari che, *“fatti perpendicolari, sono più forti et più stabili, et meglio resistono all'impetuosi scontri dell' portentosi muovimenti”*⁵; questi presentano, oltre che ispessimenti in corrispondenza degli spigoli, un medesimo spessore, in quanto *“la inegualità, havendo i suoi contrarii, per la violentia fanno contrarii effetti, et sempre la minore parte de' muri sottili è quella che viene a mancare et essere dissutile”*⁶.

L'altezza della costruzione è limitata a un piano fuori terra con un numero di aperture contenuto caratterizzate dalla presenza di archi di scarico superiori, che *“sicurissimi sono negli edifici [...], et quando sono doppii sono assai migliori”*⁷; la resistenza di tali strutture ai terremoti è testimoniata dal loro impiego *“in altre reliquie delle eccellenti fabriche di Roma, et fuori di essa”*⁸.

1 Nato a Napoli nei primi decenni del XVI secolo, si recò a Roma per dedicarsi agli studi pittorici, per avvicinarsi solo in un secondo momento all'archeologia e all'architettura, nei quali campi fu particolarmente attivo. Al tramonto della carriera romana, Ligorio accettò l'invito di Alfonso II d'Este per impreziosire la città di Ferrara. Si trovò in città durante il terremoto del 1570, in seguito al quale progettò un nuovo sistema antisismico. *Ligorio, Pirro*, voce Dizionario biografico degli italiani, Volume 65 (2005). [https://www.treccani.it/enciclopedia/pirro-ligorio_\(Dizionario-Biografico\)](https://www.treccani.it/enciclopedia/pirro-ligorio_(Dizionario-Biografico))

2 E. Guidoboni (a cura di), *Pirro Ligorio. Libro di diversi terremoti*, «Edizione Nazionale delle Opere di Pirro Ligorio», Libri delle Antichità, Torino, Volume 28, De Luca Editori d'Arte, Roma, 2005, Introduzione.

3 *Idem*, p. 19.

4 *Idem*, p. 93.

5-8 *Idem*, pp. 94-95.

Le prime tecniche costruttive antisismiche

Le odierne tecniche di consolidamento antisismiche sono figlie del progresso scientifico e culturale che caratterizza l'età dei lumi; il fermento culturale del XVIII secolo porta allo sviluppo dei primi presidi e delle prime norme in tale ambito. La **gaiola pombalina** e la **casa baraccata** rappresentano i primi due sistemi costruttivi espressamente antisismici, entrambi basati sull'impiego di elementi lignei integrati all'interno della compagine muraria, finalizzati a consolidarne le connessioni. L'elevato grado di dettaglio sviluppato nella concezione strutturale di tali sistemi suggerisce un graduale processo evolutivo grazie al quale tecniche costruttive tradizionali raggiunsero, in questo periodo, la piena definizione formale.¹

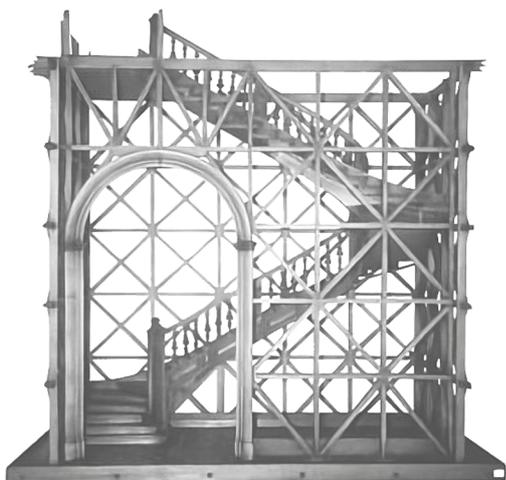


Fig. 2, *Gaiola pombalina*. http://www-ext.inec.pt/L-NEC/DE/NESDE/divulgacao/gaiol_const_sism.html

Gaiola pombalina terremoto di Lisbona, 1755

La *gaiola*, letteralmente «gabbia», pombalina (fig. 2), è parte di un più ampio progetto di rinnovamento della città di Lisbona avviato dopo il distruttivo terremoto del 1755 (fig. 3). Il linguaggio che caratterizza l'opera di ricostruzione eredita il nome del marchese di Pombal³: l'evento sismico causò danni incalcolabili e gli interventi conseguenti furono caratterizzati da una visione olistica del territorio, estesi dalla scala edilizia a quella urbana, adattandosi alle esigenze in ambito sismico e al nuovo pensiero illuminista. L'impianto urbano rigorosamente geometrico ben si associava ai nuovi prospetti il cui disegno seriale era dovuto alla struttura lignea integrata nella compagine muraria, la cosiddetta *gaiola*, che conferiva una maggiore flessibilità e uniformità alla struttura muraria.



Fig. 3, Terremoto di Lisbona del 1755.

<https://cat.ingv.it/it/media-e-documenti/news-it/300-tsu-memo-1-novembre-1755-il-terremoto-e-lo-tsunami-di-lisbona>

¹ C. Carocci, V. Macca, C. Tocci, *The roots of the 18th century turning point in earthquake-resistant building*, in J. Mascarenhas-Mateus, A. P. Pires (a cura di), *History of Construction Cultures*, Volume 2, CRC Press Balkema, Lisbona, 2021, pp. 623-630.

³ *Portogallo*, voce Enciclopedia Italiana Treccani, IV Appendice (1981), [https://www.treccani.it/enciclopedia/portogallo_res-d2b3551b-87e9-11dc-8e9d-0016357eee51_\(Enciclopedia-Italiana\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/portogallo_res-d2b3551b-87e9-11dc-8e9d-0016357eee51_(Enciclopedia-Italiana)/), u.c. gennaio 2024.

Casa baraccata terremoto calabro-messinese, 1783

Definito come “*il primo stadio della vera architettura antisismica*”⁴, le origini del sistema baraccato risalgono alla tradizione costruttiva locale. L'impiego di elementi lignei nelle architetture tradizionali era ampiamente diffuso grazie all'ingente patrimonio boschivo regionale; lo stesso Vivenzio⁵, autore dell'illustre disegno del prototipo di *Casa formate di legno* (fig. 4), ammette che quest'ultimo derivasse da “*osservazioni fatte sul luogo medesimo*”⁶. Tali preesistenze, inoltre, non erano da annoverare solo tra semplici strutture lignee ma probabilmente erano realizzate “*con piena consapevolezza di resistenza delle costruzioni di legno alle sollecitazioni indotte dai terremoti*”⁷. Prima della codifica del sistema strutturale, la casa baraccata vede un'altra applicazione in territorio campano, successiva al terremoto del 1627, conosciuta come *baraccato alla beneventana*. Solo nel 1784, dopo il terremoto calabro del 1783, si ebbe però la prescrizione relativa all'impiego di tale struttura, progettata dall'ingegnere militare del Genio Francesco La Vega, grazie alle *Istruzioni Reali*⁸ del Governo Borbonico, prima normativa antisismica d'Europa; è possibile che l'ingegnere venne influenzato dalla campagna di scavi condotta ad Ercolano, Stabia e Pompei, durante la quale ebbe l'occasione di osservare numerose strutture intelaiate ad *opus craticium* (fig. 5), ampiamente diffuse in quei territori.



Fig. 5, Casa a graticcio (*opus craticium*), Ercolano. <https://herculaneum.uk/In-s%203/Herculaneum%203%2014.htm>

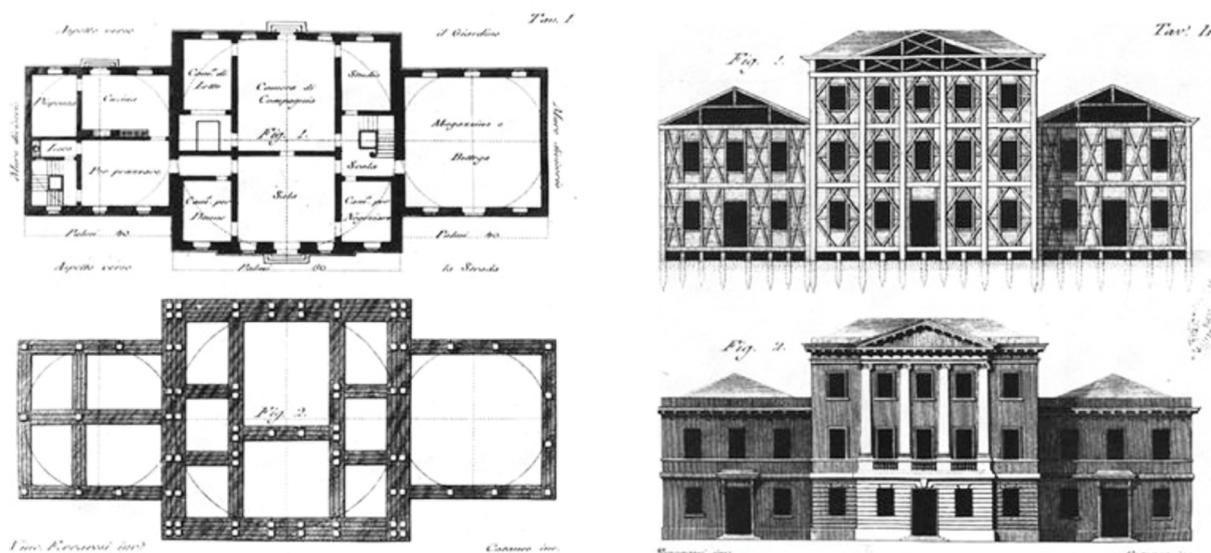


Fig. 4, Sistema baraccato. G. Vivenzio, *Istoria e teoria de'...* op. cit. in Giannantoni, *Consolidamento delle strutture...* op. cit., p. 65.

4 F. Masciari-Genoese, *Trattato di costruzioni antisismiche preceduto da un corso di sismologia*, Hoepli, Milano, 1915, p. 275, in A. Giannantoni, *Consolidamento delle strutture...* op. cit., p. 65.

5 Vivenzio, Giovanni, voce *Dizionario Biografico degli italiani*, Volume 100 (2020). [https://www.treccani.it/enciclopedia/giovanni-vivenzio_\(Dizionario-Biografico\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/giovanni-vivenzio_(Dizionario-Biografico)/), u.c. gennaio 2024.

6 G. Vivenzio, *Istoria e teoria de' tremuoti in generale ed in particolare di quelli della Calabria, e di Messina del MDCCLXXXIII*, Stamperia Reale, Napoli, 1783, p. 53, in N. Ruggieri, *Il sistema antisismico borbonico muratura con intelaiatura lignea. Genesi e sviluppo in Calabria alla fine del '700*, «*Bollettino Ingegneri*», 10, 2013, p. 5.

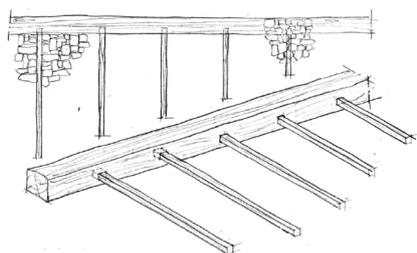
7 N. Ruggieri, *Il sistema antisismico...* op. cit., p.5.

8 Regno di Napoli, *Norme tecniche ed edilizie per ricostruire le case distrutte, anche note come Istruzioni Reali*, 20 marzo 1784, in Giannantoni, *Consolidamento delle strutture...* op. cit..

Il baraccato aquilano¹

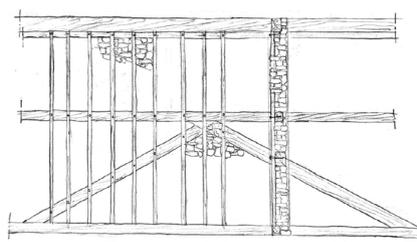
Tabella riassuntiva delle principali caratteristiche delle varie tipologie di baraccati identificati.

	Interasse montanti	Controventi	Geometria sezione	Tipologia parete	Connessioni
1	30-60 cm	no	rettangolare	divisoria	tenone-mortasa
2	30-60 cm	no	rettangolare	portante	tenone-mortasa
3	30-60 cm	si	rettangolare	portante	chiodatura
4	>60 cm	no	rettangolare	portante	entrambi
5	>60 cm	si	rettangolare	portante	chiodatura
6	-	-	irregolare	portante	-



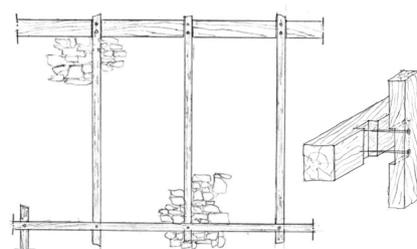
Tipologia 1, 2

Tipologie più frequentemente impiegate, si distinguono unicamente per la tipologia del setto murario che consolidano. Sono composte da due assi orizzontali posti in estremità, ai quali i montanti sono connessi tramite incastrici a tenone e mortasa. Non sempre la muratura satura i vuoti tra i montanti lignei.



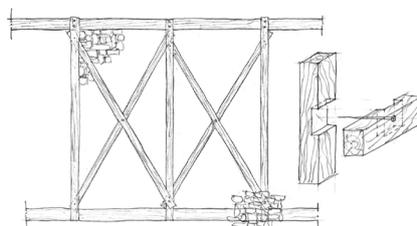
Tipologia 3

Caratterizzata da tre assi orizzontali, la tipologia presenta un sistema di controventatura, confrontabile geometricamente agli odierni sistemi a K, e due strati di montanti inchiodati agli assi orizzontali, posti su entrambe le superfici del setto murario. I vuoti sono colmati da muratura caotica.



Tipologia 4

Considerata come il precursore dell'odierna tecnica della muratura confinata, si caratterizza per la presenza di due assi orizzontali posti in estremità e montanti a interasse maggiore, connessi agli elementi principali tramite chiodatura o incastrici a tenone e mortasa.



Tipologia 5

Più vicina geometricamente al prototipo di casa baraccata, presenta due assi orizzontali e montanti che definiscono delle campate, controventate da elementi diagonali posti a X. I montanti sono connessi agli elementi principali tramite chiodatura.

Nella **Tipologia 6** rientrano le categorie di sistemi di difficile catalogazione, a causa di geometrie irregolari e non sistematiche.

¹ Tutte le immagini e i contenuti sono tratti da A. Aloisio, *The Timber-Framed (TF), Masonries in L'Aquila: The baraccato Aquilano*, «Heritage», 30, 18, 2020.



La ricerca

analisi del danno e interpretazione della risposta sismica dei sistemi voltati

3.1 6 aprile 2009

3.2 La standardizzazione del rilievo del danno

3.2.I Nuove analisi sismiche applicate al patrimonio architettonico

3.2.II Il Modello A-DC: obiettivi, punti di forza e criticità

3.3 Oggetto, metodologia e obiettivi della ricerca

3.4 Analisi dei casi studio: lettura e interpretazione del danno

3.4.I Inquadramento territoriale

3.4.II San Giuseppe Artigiano

3.4.III San Marco

3.4.IV Sant'Agostino

3.4.V Santa Maria degli Angeli

3.4.VI Santa Maria ad Cryptas

3.4.VII Santa Maria dei Raccomandati

3.5 Classificazione dei meccanismi di danno

3.5.I Meccanismo flessionale

3.5.II "a modo di mela granata"

3.5.III Scorrimento orizzontale

3.5.IV Archi "nascosti"

Capitolo 3

3.1 6 aprile 2009

1 Magnitudo momento, per la definizione vedi: Scheda tematica 1 “Eventi sismici dall’anno 1900 nell’area nazionale”, Glossario, p. 80.

2 <https://terremoti.ingv.it/event/1895389>, u.c. gennaio 2024.

3 Riportata già dalla Carta Geologica della Regione Abruzzo di Vezzani e Ghisetti del 1998, la faglia deve il nome alla località in provincia de L’Aquila in cui è superficialmente rilevabile la presenza della struttura tettonica; dopo il terremoto del 2009, il territorio è stato oggetto di indagini paleosismologiche volte a definire il periodo di attivazione della faglia. S. Gori, E. Falcucci, F. Galadini, *Ricordando il terremoto del 6 aprile 2009: 3) Geologia e paleosismologia delle faglie abruzzesi*, 2019. <https://ingvterremoti.com/2019/04/19/ricordando-il-terremoto-del-6-aprile-2009-3-geologia-e-paleosismologia-delle-faglie-abruzzesi/>, u.c. gennaio 2024.

4 Due terremoti di magnitudo Mw superiore al 4 e numerosi di minore intensità sono stati registrati nella settimana precedente al mainshock, seguito da due importanti scosse il 7 e il 9 aprile, rispettivamente di Mw 5.4 e Mw 5.2. <https://terremoti.ingv.it/>, u.c. gennaio 2024. <https://ingv.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=6f97995454034c2ea095cc85b26e0d91>, u.c. gennaio 2024.

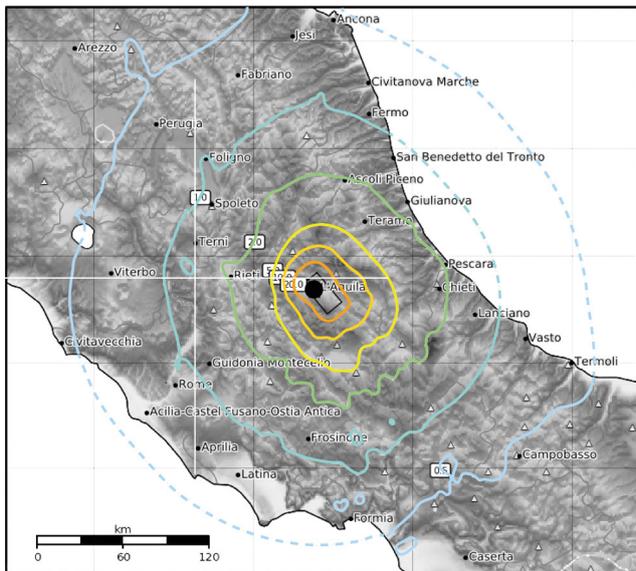
5 <https://servizio-nazionale.protezionecivile.gov.it/it/pagina-base/il-terremoto-abruzzo/>, u.c. gennaio 2024.

6 R. Camassi, et al., *L’indagine macrosismica: metodologia, parametri del terremoto, questioni aperte*, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), 2009, p.1.

In copertina: Interno della chiesa di San Giuseppe Artigiano durante gli interventi di restauro del 2011. Archivio Sintecna.s.r.l..

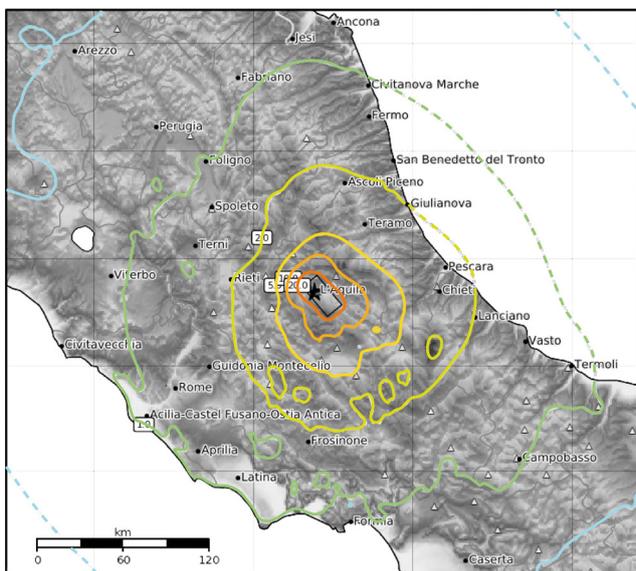
Il 6 aprile del 2009 alle ore 03:32 si è verificato, nel territorio aquilano, un terremoto di magnitudo Mw¹ 6.1, con epicentro distante circa 2 km dalla città de L’Aquila e ipocentro localizzato a una profondità di circa 8 km². Il fenomeno sismico, originatosi lungo la faglia di Paganica³, estesa per 15 km in direzione nord-ovest sud-est, costituiva l’evento più violento di uno sciame sismico che, avviatosi nel dicembre dell’anno precedente, si protrasse fino al mese di luglio⁴: la rete sismometrica nazionale, gestita dall’INGV, registrò e localizzò oltre cinque mila scosse nel mese di aprile, di cui centocinquanta con magnitudo maggiore di 3⁵. Preceduto da numerose scosse verificatesi a partire dal 30 marzo, il terremoto tra il 5 e il 6 aprile non colse di sorpresa gli aquilani “*così che l’evento devastante delle 3.32 ha causato forse meno vittime di quante la gravità dei danni ne avrebbe provocato*”⁶. Il bilancio fu funesto: vennero registrate 309 vittime, con oltre 1500 feriti e circa 70 mila sfollati. Il sisma si avvertì in tutta l’Italia peninsulare, con forte intensità nelle regioni centrali e minore in quelle settentrionali e meridionali⁷ (fig. 3.4).

Il gruppo di pronto intervento macrosismico QUEST (Quick Earthquake Survey Team), costituito da operatori afferenti a differenti istituzioni⁸, avviò rapidamente il rilievo degli effetti macrosismici, necessario per la programmazione delle attività di messa in sicurezza dei luoghi condotte dalla Protezione Civile. Molti furono gli enti che collaborarono durante



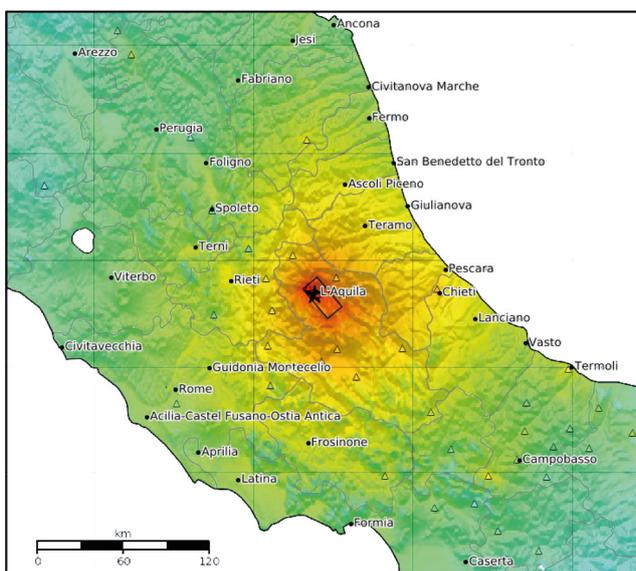
0.1 0.2 0.5 1 2 5 10 20 50 100 200 **PGA (%)**

Fig. 3.1, Mappa di scuotimento relativa alla PGA (Peak Ground Acceleration) [%g]. <https://terremoti.ingv.it/event/1895389>



0.1 0.2 0.5 1 2 5 10 20 50 100 200 **PGV (cm/s)**

Fig. 3.2, Mappa di scuotimento relativa alla PGV (Peak Ground Velocity) [cm/s]. <https://terremoti.ingv.it/event/1895389>



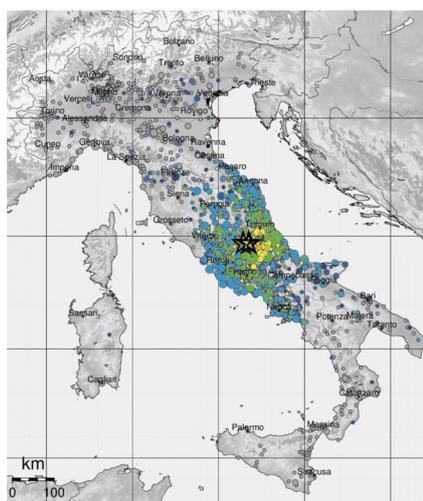
I II-III IV V VI VII VIII IX X+ **MCS**

Fig. 3.3, Mappa di scuotimento relativa all'intensità. <https://terremoti.ingv.it/event/1895389>

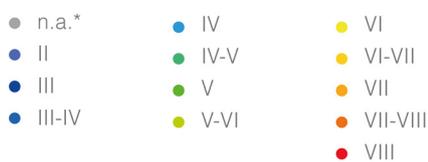
7 *Idem.*

8 Il gruppo era costituito da “squadre di rilevatori delle sezioni INGV di Bologna, Roma, Napoli e Catania, da alcune squadre del Dipartimento Nazionale della Protezione Civile (supportate da tecnici ENEA) e da colleghi dell’Università della Basilicata e del CNR (IMAA)”. P. Galli, R. Camassi, *Rapporto sugli effetti del terremoto aquilano del 6 aprile 2009*, Rapporto congiunto DPC-INGV, 2009, p. 1.

9 F. da Porto, B. Silva, C. Costa, C. Modena, *Macro-Scale Analysis of Damage to Churches after Earthquake in Abruzzo (Italy) on April 6, 2009*, «Journal of Earthquake Engineering», 16, 2012, pp. 739-758.



Intensità percepita [MCS]



☆ Epicentro strumentale

* non avvertito

Numero questionari



Figg. 3.4, Mappa del risentimento sismico, elaborata dalle 11.138 risposte al questionario somministrato online (<http://www.hs.it>). https://e.hs.it/1895389/1895389_mcs.jpg.

lo svolgimento delle procedure in fase emergenziale, il Ministero della Cultura, la Direzione di Comando e Controllo (Di.Coma.C) afferente al Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, le Università (tra cui quelle di Padova, Milano e Genova), il Centro Operativo Misto (COM)⁹. L’ampia gamma di tipologie edilizie presenti sui territori oggetto di intervento ha reso ardua la valutazione della intensità macrosismica: le stime, misurate sulla base dell’entità del danno riportato, sono risultate spesso differenti a causa della diversa risposta sismica degli edifici localizzati nei centri storici rispetto a quella registrata nell’edilizia delle periferie. L’area macrosismica rilevata, estesa principalmente in direzione nord-ovest sud-est, seguendo la direzione della struttura *sismogenetica*¹⁰, comprende trecento sedici comuni, nei quali è stata registrata un’intensità del sisma maggiore del V grado MCS; tra questi, i più danneggiati furono Onna e Castelnuovo (IX-X MCS), Tempera, San Gregorio, San Demetrio e Villa Sant’Angelo (IX MCS); al capoluogo aquilano è stato assegnato un valore di intensità pari a VIII MCS per i quartieri di più recente urbanizzazione e IX per il centro storico, fortemente caratterizzato dalla presenza di edilizia storica.¹¹

L’attività di rilievo del danno del patrimonio architettonico è stato svolto da gruppi tecnici multidisciplinari con l’ausilio di modelli schedografici impiegati in caso di calamità naturali, che hanno consentito l’elaborazione di dati relativi a circa milleottocento edifici storici, di cui un migliaio religiosi, circa settecento residenziali e i restanti afferenti a

tipologie speciali quali torri, mura cittadine, fontane e a siti archeologici; dal campione è risultato inagibile il 74% dei palazzi e il 37%, delle chiese.¹²

3.2 La standardizzazione del rilievo del danno

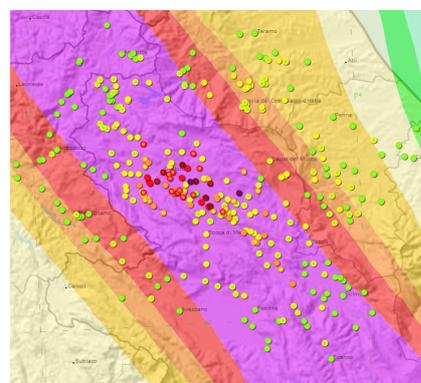
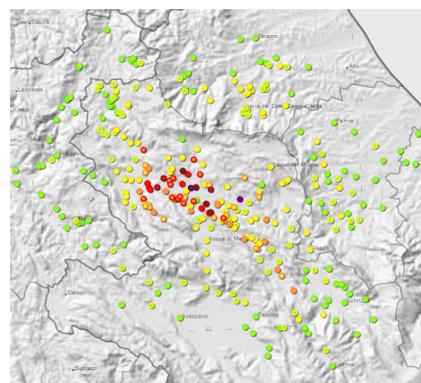
3.2.1 Nuove analisi sismiche applicate al patrimonio architettonico

Lo studio sistematico del patrimonio architettonico storico danneggiato dagli eventi sismici è stato avviato in tempi relativamente recenti; è stato il devastante terremoto del Friuli del 1976 ad evidenziare la necessità di una pianificazione strategica delle attività di rilievo e messa in sicurezza del patrimonio culturale. Il Gruppo Nazionale per la Difesa dei Terremoti (GNDT) venne costituito nel 1983 presso il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)¹³ come “organo della Protezione Civile per il coordinamento delle ricerche scientifiche nel settore della mitigazione del rischio sismico”¹⁴; a tale gruppo si deve la formulazione del primo modello schedografico volto al rilievo del danno dell’edilizia religiosa. Il Modello S3 consentiva di interpretare la risposta sismica delle fabbriche suddividendole in componenti architettonici, definiti *macroelementi*, i cui comportamenti strutturali potevano essere analizzati autonomamente rispetto alla risposta globale dell’edificio. Il modello presentava, quindi, 18 meccanismi di collasso attivabili negli organismi edilizi, a cui i danni osservati potevano essere ricondotti per una maggiore facilità di analisi strutturale. La

10 Le zone sismogenetiche sono “aree che, sulla base di indizi geologici, sismotettonici oppure sulla base della sismicità storica, si possano ritenere dotate di un tasso di sismicità [...] uniforme sull’estensione della zona stessa”. E. Faccioli, R. Paolucci, *Elementi di sismologia applicata all’ingegneria*, Pitagora, Bologna, 2005, p. 190.

11 Per approfondimenti: R. Camassi, et al., *L’indagine macrosismica... op. cit.*; P. Galli, R. Camassi, *Rapporto sugli effetti... op. cit.*

12 F. da Porto, B. Silva, C. Costa, C. Modena, *Macro-Scale Analysis... op. cit.*; A. M. Reggiani, *Il patrimonio ferito dell’Aquila*, «Revista del Seminario de Arqueología de la Universidad Pablo de Olavide de Sevilla», 10, 2011, pp. 307-342.



Figg. 3.5, 3.6, Intensità macrosismiche assegnate alle varie località e sovrapposizione con la mappa di pericolosità sismica. https://emidius.mi.ingv.it/ASMI/event/20090406_0132_000?page=2

13 Decreto Interministeriale del 7 luglio 1983.

14 Le principali mansioni di tale organo riguardano la consulenza scientifica e normativa, la promozione e lo sviluppo di ricerche interdisciplinari volte all'evoluzione delle conoscenze sismologiche, la gestione delle azioni di intervento di nell'ambito tecnico e la promozione di esperienze di interscambio internazionali del settore in oggetto. <https://emidius.mi.ingv.it/GNDT2/MenuTree/Home.htm>, u.c. gennaio 2024.

15 DPCM n. 4236 del 24/11/1999 e n. 133 del 23/01/2001. S. Papa, G. Di Pasquale, *Manuale per la compilazione della scheda per il rilievo del danno ai beni culturali, Chiese. MODELLO A-DC*, Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Protezione Civile, 2011, p. 5.

16 Le schede furono approvate con Decreto Interministeriale del 3 maggio 2001, pubblicato sulla G.U. n. 116 del 21/05/2001.

scheda, successivamente implementata, venne impiegata per il rilievo del danno a seguito dei terremoti di Parma (1986), Emilia Romagna (1996), Umbria e Marche (1997), Pollino (1998). Nell'ambito del Dipartimento della Protezione Civile, è stato successivamente costituito il Gruppo di Lavoro per la Prevenzione dei Beni Culturali (GLABEC), incaricato "*della predisposizione di modelli di rilevamento e censimento delle condizioni, risorse e vulnerabilità del patrimonio culturale nazionale*"¹⁵; vennero quindi proposte delle schede relative ai beni patrimoniali mobili e immobili¹⁶, ad integrazione dei precedenti form, utilizzate in seguito ai terremoti del Molise (2002) e Puglia (2004). Ulteriormente aggiornate, le schede sono state approvate con DPCM n. 185 del 23/02/2006, pubblicato sulla G.U. n. 55 del 07/03/2006. In particolare, i tre modelli predisposti riguardano le due principali tipologie edilizie, chiese (Modello A-DC) e palazzi (Modello B-DP), e i beni mobili (C-BM).¹⁷

3.2.II Il Modello A-DC: obiettivi, punti di forza e criticità

La compilazione del Modello A-DC si prefissa tre obiettivi principali: la definizione del grado di agibilità del manufatto, l'individuazione delle opere provvisoriale per la messa in sicurezza e l'elaborazione di una prima stima dei finanziamenti da allocare per i successivi interventi di restauro e miglioramento sismico. La prima sezione della scheda contiene i dati identificativi dell'edificio, la seconda parte è finalizzata "*all'individuazione dei*

*cinematismi di collasso potenzialmente attivabili ed alla valutazione del livello di danno dei meccanismi attivati*¹⁸: sono proposti 28 meccanismi di danno, comprendenti cinematismi di primo e secondo modo di 13 macroelementi (fig. 3.7). Ciò rende possibile l'assegnazione di un grado di agibilità al manufatto¹⁹ e la definizione dell'indice di danno, un parametro numerico²⁰ che “*rappresenta una sintesi del livello di danno subito nei diversi macroelementi della chiesa [...] valutato tramite una media normalizzata dei danni rilevati*”²¹. Nonostante la scheda non lo preveda, un secondo indice frequentemente riportato nelle relazioni di danno è l'indice di vulnerabilità, la cui procedura di valutazione è illustrata nelle *Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale*²². Anch'esso espresso sotto forma numerica²³, “*rappresenta una sintesi del rilievo di vulnerabilità per i diversi macroelementi [...], definito come la media pesata del comportamento delle diverse parti della chiesa*”²⁴.

Frutto di anni di esperienze maturate sul campo, i modelli per il rilevamento dei danni dovuti a eventi calamitosi hanno come obiettivo quello di standardizzare il lavoro di rilievo del danno, attraverso un intuitivo «percorso guidato» che consente una maggiore rapidità nello svolgimento delle azioni in fase di emergenza, e quello di facilitare la successiva elaborazione dei dati. L'adozione di un linguaggio standardizzato a livello nazionale rende possibile l'omogeneizzazione e, di conseguenza, la comparazione dei dati rilevati in luoghi e tempi

17 Per approfondimenti: S. Papa, G. Di Pasquale, *Manuale... op. cit.*; S. Lagomarsino, *Damage assessment of churches after L'Aquila earthquake (2009)*, «Bulletin of Earthquake Engineering», 10, 2012, pp. 73-92; R. Sisti, E. Cescatti, V. Follador, F. da Porto, C. Calderini, S. Lagomarsino, M. Morici, A. Prota, *Operational critical issues filling in the Italian form for the post-earthquake damage assessment of churches (A-DC 2006)*, XIX Convegno ANIDIS, L'ingegneria sismica in Italia, Torino, 2022; F. da Porto, B. Silva, C. Costa, C. Modena, *Macro-Scale Analysis of Damage to Churches after Earthquake in Abruzzo (Italy) on April 6, 2009*, «Journal of Earthquake Engineering», 16, 2012, pp. 739-758; C. Q. M. Costa, *Seismic vulnerability of historical structures. Damage state of the Abruzzo churches, in the sequence of the 2009 earthquake*, Master's Thesis, Erasmus Mundus Advanced Master in Structural Analysis of Monuments and Historical Constructions, Università di Padova, 2009; C. Modena, F. da Porto, G. Bettiol, M. Giaretton, *Edilizia storia monumentale - Salvaguardia degli edifici di interesse storico-artistico nell'emergenza post-sisma*, «Progettazione sismica», pp. 211-221.

18 C. Calderini, S. Lagomarsino, *Chiesa di Sant'Agostino. Note storiche e costruttive. Lettura del danno e della vulnerabilità. Considerazioni sul restauro e la ricostruzione*, Università degli Studi di Genova Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni dell'Ambiente e del Territorio, p. 133.

19 La scheda identifica sei livelli di agibilità: *agibile, agibile con provvedimenti, parzialmente agibile, temporaneamente inagibile, inagibile, inagibile per cause esterne*. Dipartimento della Protezione Civile, *Scheda per il rilievo del danno ai beni culturali - Chiese*, Modello A-DC, 2006.

20 L'indice di danno può assumere un valore compreso tra 0 e 1 e si calcola considerando il livello di danno assegnato ai meccanismi attivati. Quest'ultimo è graduato su una scala di 5 livelli: 0 danno nullo, 1 danno lieve, 2 danno medio, 3 danno grave, 4 situazione prossima al crollo, 5 collasso.

$$I_d = \frac{1}{5} \cdot \frac{\sum_{k=1}^N p_k d_k}{\sum_{k=1}^N p_k}$$

p_k peso assegnato a ciascun meccanismo (pari ad 1)
 d_k livello di danno subito nei riguardi del k-esimo meccanismo (da 0 a 5)
 N numero di meccanismi che si sarebbero potuti attivare nella chiesa ($N \leq 28$)

21 C. Calderini, S. Lagomarsino, *Chiesa di Sant'Agostino...* op. cit., p. 133.

22 DPCM del 12/10/2007, pubblicata sulla G.U. n. 24 29/01/2008.

23 L'indice di vulnerabilità può assumere un valore compreso tra 0 e 1 e si calcola valutando l'efficacia dei presidi antisismici e degli indicatori di vulnerabilità su una scala da 1, più dannoso, a 3, meno dannoso.

$$I_v = \frac{1}{6} \cdot \frac{\sum_{k=1}^{28} v_{ki} - v_{kp}}{\sum_{k=1}^{28} p_k} + \frac{1}{2}$$

per il k-esimo meccanismo:

v_{ki} punteggio ottenuto dal rilievo degli indicatori di vulnerabilità
 v_{kp} punteggio ottenuto dal rilievo dei presidi antisismici

24 C. Calderini, S. Lagomarsino, *Chiesa di Sant'Agostino...* op. cit., p. 133.

25 F. da Porto, B. Silva, C. Costa, C. Modena, *Macro-Scale Analysis...* op. cit.; C. Q. M. Costa, *Seismic vulnerability...* op. cit..

differenti. così realizzati costituiscono potenti strumenti per l'analisi della vulnerabilità sismica: dopo il terremoto del 2009, l'Università di Padova²⁵ ha condotto valutazioni statistiche sulle probabilità di attivazione dei singoli meccanismi, identificando i macroelementi più vulnerabili e traendo importanti conclusioni.

Le analisi svolte hanno fatto emergere alcune criticità sulla struttura del modello. In particolare, la definizione dei macroelementi legata più alle funzioni dei vari spazi che agli elementi architettonici e strutturali in sé, determina un'incertezza risolta tramite valutazioni soggettive; ciò determina un più ampio margine di errore dell'indice di danno che, dalle analisi precedentemente citate, è risultato non sempre aderente all'indice di danno calcolato per l'intero edificio. Altre criticità emerse derivano più da osservazioni puntuali che dall'impostazione del modello, come ad esempio la possibilità di definire l'eventuale funzione strutturale dell'elemento, necessaria soprattutto nel caso dei sistemi voltati. In generale, le lacune o le imprecisioni più o meno gravi del form determinano delle ambiguità nelle risposte che rendono necessaria una formazione specifica dei tecnici incaricati. L'eccessiva standardizzazione, infatti, non risulta strumento adeguato o quantomeno sufficiente nell'analisi di questo tipo di strutture che, per la loro complessità, necessitano di approfondimenti e valutazioni specifiche.²⁶

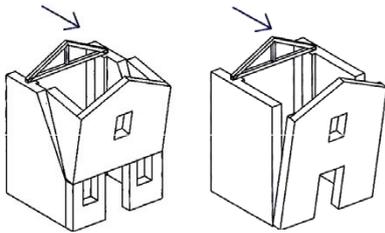
3.3 Oggetto, metodologia e obiettivi della ricerca

Il tema della ricerca ha riguardato i meccanismi di danno attivati dal sisma del 6 aprile negli edifici religiosi del territorio aquilano, con particolare attenzione ai sistemi voltati.

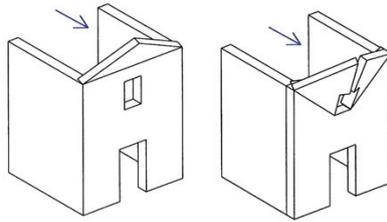
Fortemente caratterizzanti l'edilizia religiosa, i sistemi voltati sono molto diffusi principalmente nelle fabbriche storiche di maggior pregio. L'ampia varietà di tipologie rilevabili nelle fabbriche religiose ha indotto ad escludere l'edilizia palaziale, che pure ricopre un importante ruolo all'interno dell'edilizia aquilana. Le diverse tipologie si differenziano fra loro per funzione, geometria e tecniche costruttive: molto diffusi sono i sistemi voltati «non strutturali», che non sorreggono altri carichi se non quelli derivanti dal peso proprio; la maggior parte di tali strutture è costituita dalle cosiddette volte in foglio, che presentano un'apparecchiatura con blocchi laterizi posati di piatto, e, nel territorio aquilano, è anche diffuso l'impiego di volte in camorcanna, o in cannucciato, che possono essere appese alla sovrastante struttura di copertura attraverso un sistema di pendagliatura o presentare una struttura portante lignea. L'utilizzo di sistemi leggeri, in zone ad alto rischio sismico, è finalizzato ad alleggerire il peso della struttura, riducendo proporzionalmente la forza sismica. L'ampio ventaglio di geometrie presentate dai sistemi voltati è di grande interesse sia dal punto di vista estetico e compositivo, consentendo di caratterizzare

26 Per approfondimenti: R. Sisti, E. Cescatti, V. Follador, F. da Porto, C. Calderini, S. Lagomarsino, M. Morici, A. Prota, *Operational critical issues...* op. cit.; F. da Porto, B. Silva, C. Costa, C. Modena, *Macro-Scale Analysis...* op. cit.; C. Q. M. Costa, *Seismic vulnerability...* op. cit.

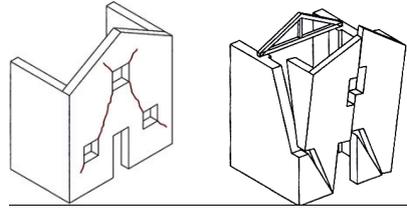
1. RIBALTAMENTO DELLA FACCIATA



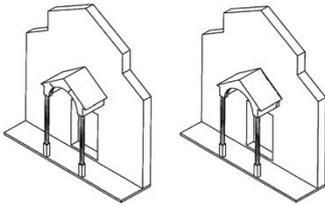
2. MECCANISMI NELLA SOMMITÀ DELLA FACCIATA



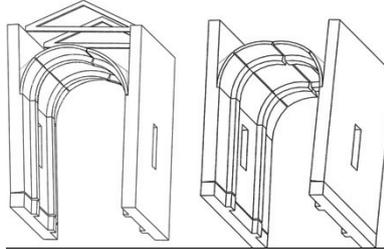
3. MECCANISMI NEL PIANO DELLA FACCIATA



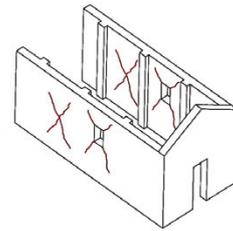
4 - PROTIRO E NARTECE



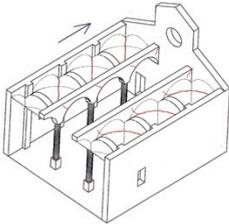
5 - RISPOSTA TRASVERSALE DELL'AULA



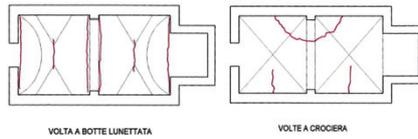
6 - MECCANISMI DI TAGLIO PARETI LATERALI



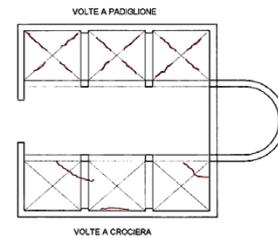
7 - RISPOSTA LONGITUDINALE DEL COLONNATO



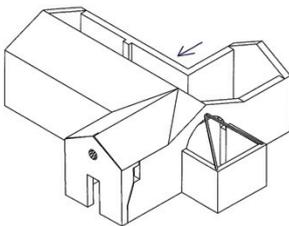
8 - VOLTE DELL'AULA O DELLA NAVATA CENTRALE



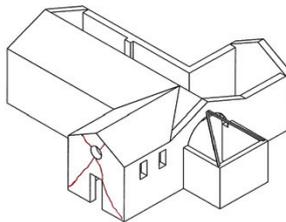
9 - VOLTE DELLE NAVATE LATERALI



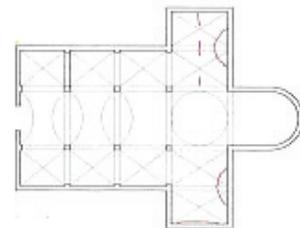
10 - RIBALTAMENTO PARETI DEL TRANSETTO



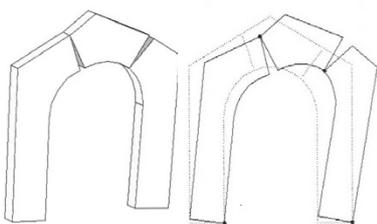
11 - MECCANISMI DI TAGLIO DEL TRANSETTO



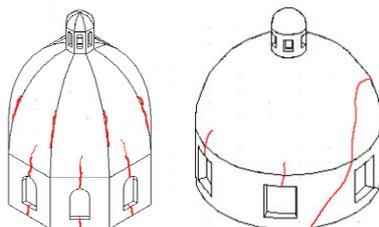
12 - VOLTE DEL TRANSETTO



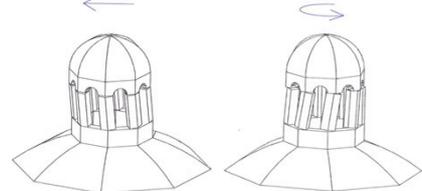
13 - ARCHI TRIONFALI



14 - CUPOLA E TAMBURO / TIBURIO



15 - LANTERNA



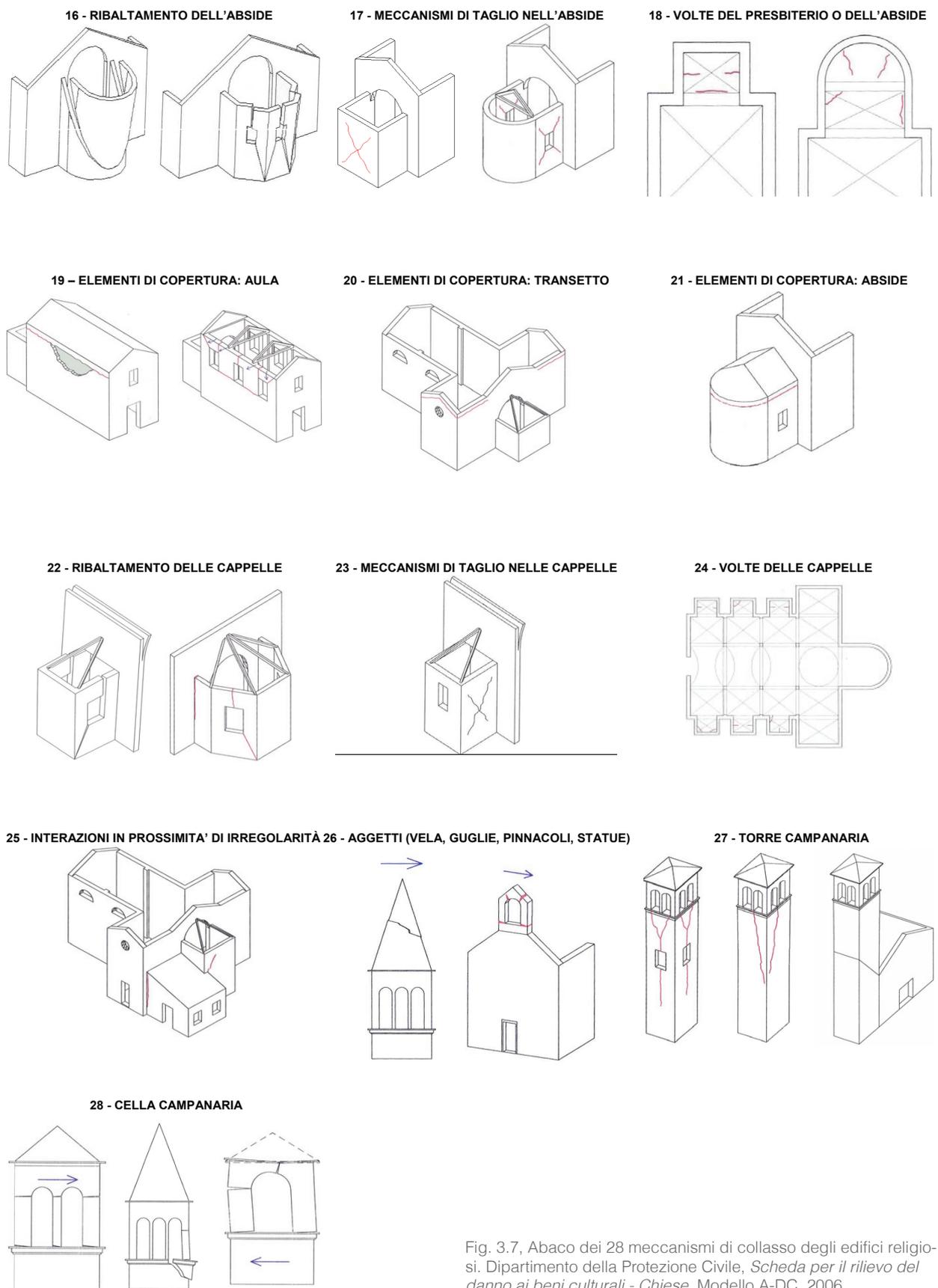


Fig. 3.7, Abaco dei 28 meccanismi di collasso degli edifici religiosi. Dipartimento della Protezione Civile, Scheda per il rilievo del danno ai beni culturali - Chiese, Modello A-DC, 2006.

gli spazi modificandone la percezione, sia dal punto di vista statico, differenziandosi i vari sistemi per il comportamento meccanico.

I sistemi voltati sono qui considerati dal punto di vista del loro comportamento sismico con la finalità di comprendere come i grandi monumenti storici che li contengono hanno reagito ai terremoti; la ricchezza della documentazione relativa ai danni subiti dal patrimonio architettonico storico, ha indirizzato la scelta sul terremoto de L'Aquila del 2009. La disponibilità di una gran quantità di dati raccolti sia durante la fase emergenziale sia in occasione delle attività di ricostruzione, purtroppo ancora in corso, ha infatti consentito un'analisi approfondita di tutti gli aspetti strutturali delle fabbriche prese in esame, dalle origini all'evoluzione tecnico costruttiva fino al danno riportato a seguito del terremoto.

In particolare, quindi, il lavoro di ricerca è stato svolto sul materiale preesistente, elaborato prevalentemente negli anni subito successivi al sisma e attinenti sia ad analisi più spedita, sia a progetti di restauro condotti su alcune delle fabbriche in esame, quindi con differenti gradi di dettaglio e approfondimento. Il primo lavoro di analisi sui rilievi più o meno elaborati delle fabbriche ha consentito di effettuare una prima selezione dei casi studio da analizzare, svolta sulla base del materiale a disposizione e sull'entità del danno riportato dai sistemi voltati. Basandosi sul quadro fessurativo riportato, rilevato dalle analisi precedenti o osservabile dal repertorio fotografico

fornito, e su ipotesi relative alla risposta sismica globale dell'edificio, è stata condotta un'analisi sistematica su diversi casi studio che ha avuto come obiettivo quello di risalire al meccanismo attivato dal terremoto, al movimento, quindi, a cui le chiese sono state soggette, a partire dall'osservazione del danno riportato.

Le chiese comprese nell'analisi sono state dodici, situate all'interno dell'ambito territoriale definito dell'Arcidiocesi de L'Aquila, di cui otto nel centro storico aquilano e le restanti quattro in comuni limitrofi, in particolare una a Fossa, una a Poggio Picenze e tre nel comune di San Demetrio ne' Vestini.

Delle dodici chiese, selezionate in base al materiale reperito, quale informazione di carattere storico, descrizione morfologica e tipologica del fabbricato, tecniche costruttive impiegate e descrizione del danno riportato dopo il terremoto del 2009, sei sono state analizzate nel dettaglio, realizzando per ognuna una scheda sintetica (relativa alla prima fondazione, alle trasformazioni subite, alle note costruttive e all'interpretazione del danno), il rilievo del danno e l'interpretazione del quadro fessurativo osservato, risalendo al cinematismo che l'ha determinato.

Le restanti sei, riportando lesioni di natura simile alle altre e riuscendo, pertanto, a risalire al medesimo meccanismo, sono state semplicemente inserite come casi studio nella classificazione finale dei meccanismi.

L'obiettivo della ricerca, oltre che l'acquisizione di competenze legate ad uno specifico ambito, è

stato quello di verificare la possibilità di individuare categorie ricorrenti del comportamento sismico dei sistemi voltati, distinguendole sulla base delle caratteristiche di impianto e costruttive dei sistemi stessi, delle loro fasi evolutive e degli interventi su di essi effettuati nel corso dei secoli. Tale individuazione è stata effettuata a partire dalla osservazione della realtà costruita (contenuta nel capitolo 2) interpretandone le modalità di risposta al sisma sulla base del quadro teorico ormai convalidato relativo alla statica degli archi (esposta nel capitolo 1); secondo un processo metodologico nel quale il modello teorico supporta la fase di interpretazione del dato fisico e, da questo, viene legittimato.

3.4 **Analisi dei casi studio**

lettura e interpretazione del danno

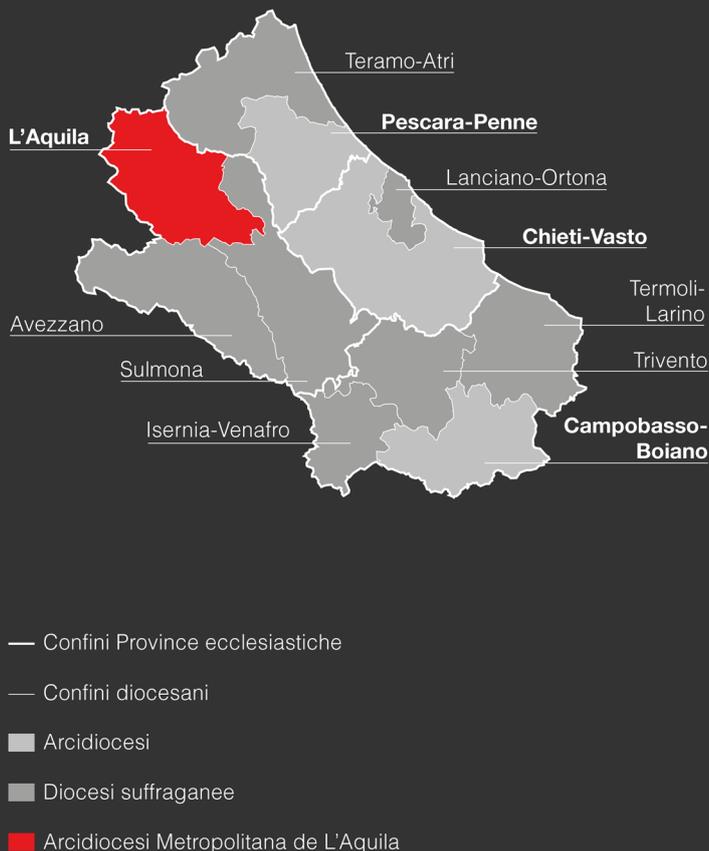
3.4.1 Inquadramento territoriale

Regione ecclesiastica Abruzzo-Molise



L'ambito territoriale di analisi è l'Arcidiocesi de L'Aquila, parte della **Regione ecclesiastica Abruzzo-Molise**. L'istituzione nasce ufficialmente nel **1976**, durante un periodo di ridefinizione degli enti chiesastici a livello nazionale. Dopo i grandi stravolgimenti del periodo post-bellico, si arriva, infatti, alla definizione dell'attuale configurazione amministrativo-territoriale delle diocesi italiane, suddivise in sedici Regioni ecclesiastiche che, avendo differenti origini e sviluppi rispetto allo Stato italiano, non sempre ne ricalcano i **limiti amministrativi**.

In particolare, la Regione ecclesiastica Abruzzo-Molise è suddivisa in **quattro province ecclesiastiche**, per un totale di undici diocesi. Tra queste, è possibile distinguere, all'interno di ogni provincia, un'**arcidiocesi** e le restanti **diocesi** ad essa subordinate, denominate suffraganee.



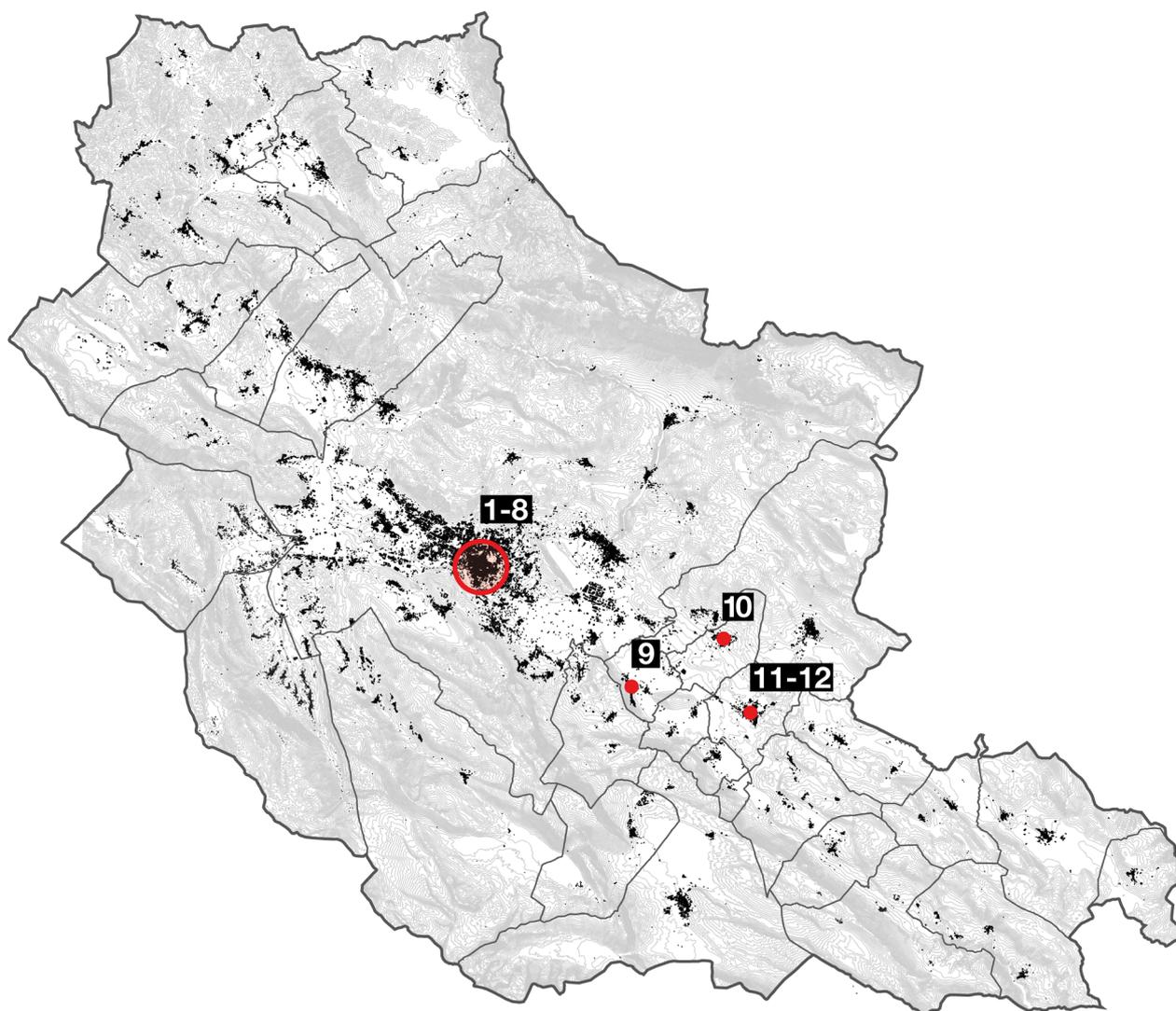
Fonti per gli elaborati grafici

<https://www.chieseabruzzomolise.it>

<https://www.chiesadilaquila.it>

Base cartografica

<http://geoportale.regione.abruzzo.it/Cartanet>



Le dodici chiese **prese in esame**, di cui sei **analizzate** nel dettaglio, sono localizzate in quattro differenti comuni dell'Arcidiocesi de L'Aquila.

- 1** Santa Maria Paganica
- 2** Santa Margherita
- 3** Santa Caterina
- 4** San Giuseppe Artigiano
- 5** San Marco
- 6** Sant'Agostino
- 7** Santa Giusta
- 8** Santa Maria degli Angeli
- 9** Santa Maria ad Cryptas
- 10** San Felice Martire
- 11** Santa Maria dei Raccomandati
- 12** San Giovanni

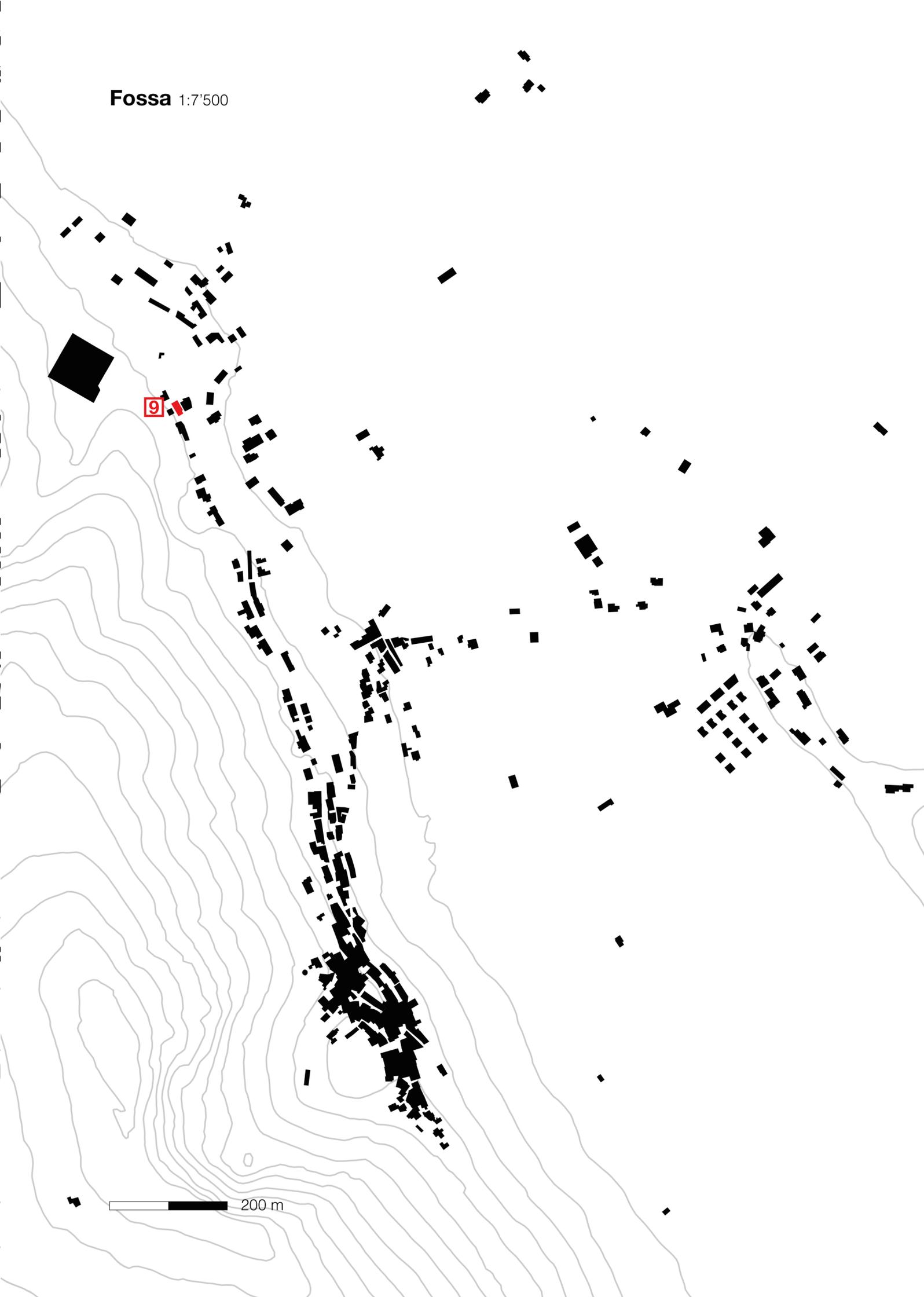
Il territorio dell'aquilano è sempre stato caratterizzato da una forte presenza religiosa: risale al **1256** la nascita della prima diocesi, insignita della dignità arcivescovile nel **1876** e dichiarata sede Metropolitana nel **1972**. Venne allora definita la provincia ecclesiastica, comprendente anche le due diocesi suffraganee di Avezzano e Sulmona. Il territorio dell'odierna **Arcidiocesi Metropolitana de L'Aquila** si estende per 1'516 km², comprendendo **28 comuni** della provincia de L'Aquila e **148 parrocchie**; è intitolata a San Massimo Levita e Martire e i compatroni sono Sant'Equizio, San Pietro Celestino e San Bernardino da Siena.

L'Aquila 1:7'500

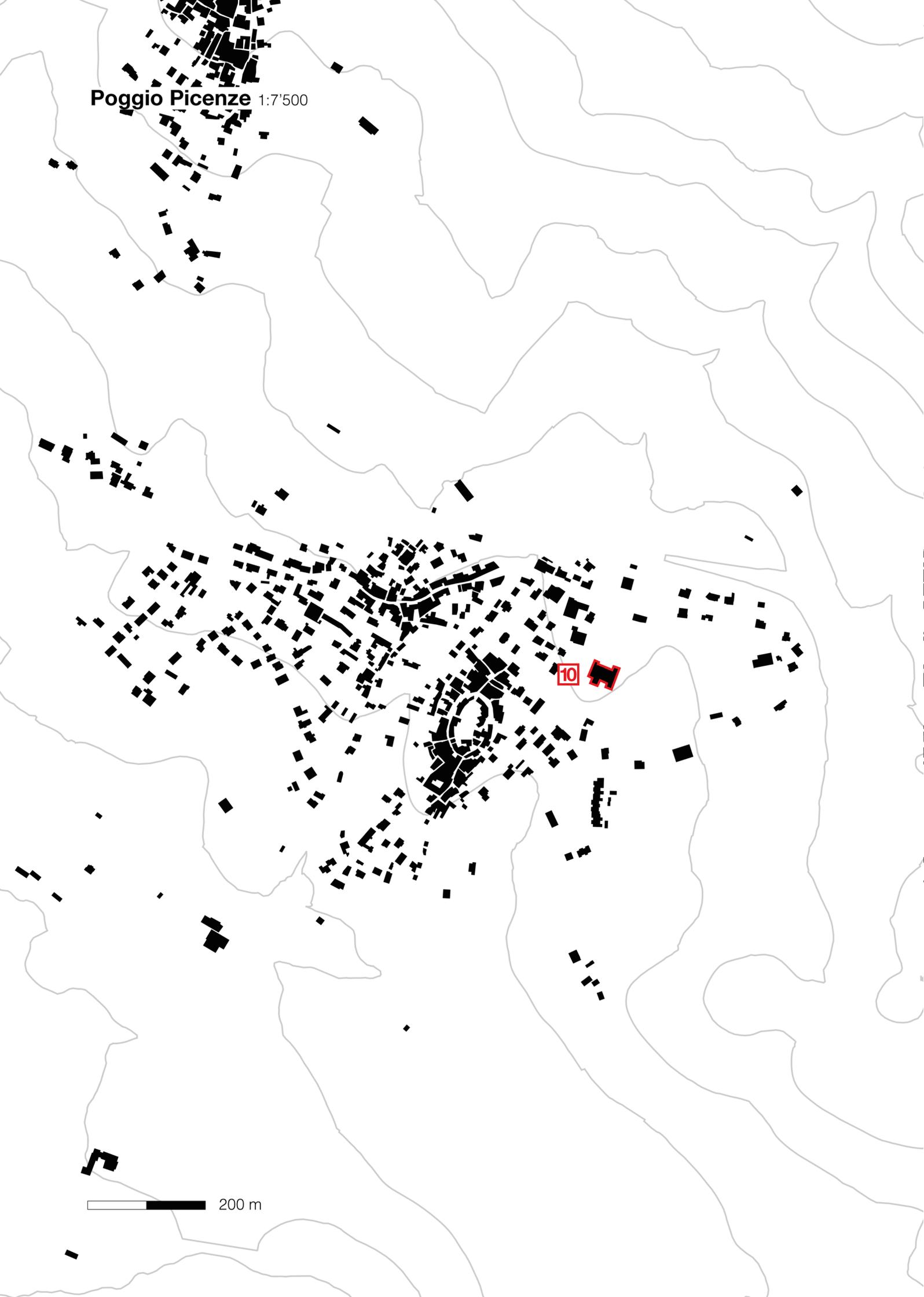


200 m

Fossa 1:7'500



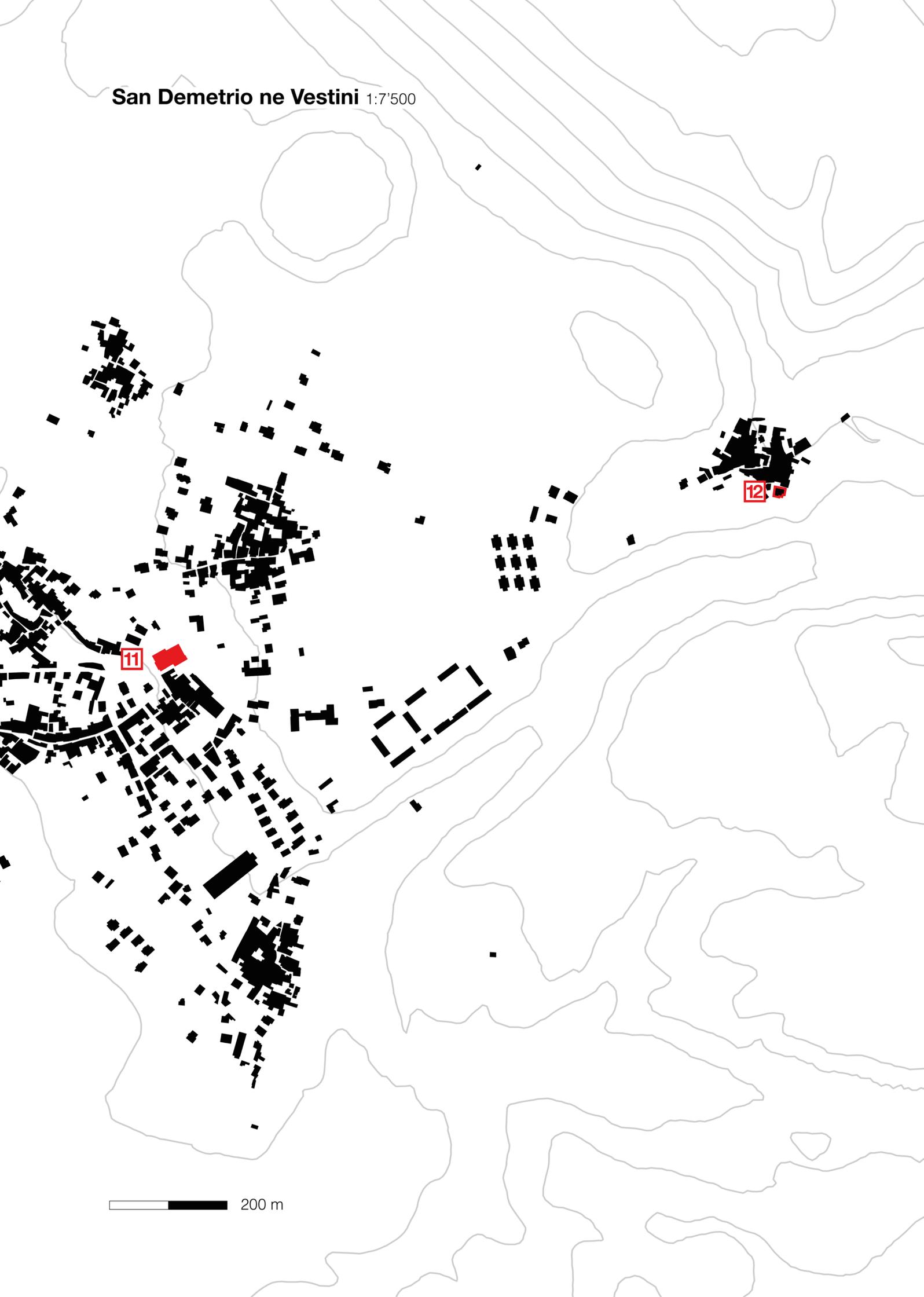
Poggio Picenze 1:7'500



10

200 m

San Demetrio ne Vestini 1:7'500



200 m

Convenzioni grafiche

Rilievo del danno

-  fessurazione
-  distacco superficiale
-  crollo

Interpretazione del danno e cinematismi

-  posizione indeformata
-  asse di rotazione
-  linea di sezione
-  superfici lesionate
-  superfici sezionate
-  contesto
-  direzione del moto del suolo

Grado di affidabilità dei meccanismi

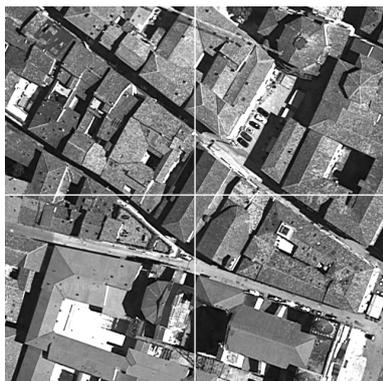
-  scarsa presenza di fonti
-  discreta presenza di fonti
-  consistente presenza di fonti

Chiesa di San Giuseppe Artigiano

Fonti

- 1 L. D. Decanini, D. Liberatore, L. Liberatore, E. Raglione, L. Sorrentino, *Chiesa di San Biagio d'Amiternum. Analisi dei danni causati dal terremoto del 6 aprile 2009 al patrimonio culturale*, Vice-Commissariato Straordinario per i Beni Culturali Danneggiati dal Terremoto del 6 Aprile 2009, Università degli studi di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, 2009.
- 2 L. Binda, C. Chesi, M. A. Parisi, *Seismic damage to churches: Observations from the L'Aquila, Italy, Earthquake and considerations on a case-study*, «Advances Materials Research», 133-134, 2010, pp. 641-646.
- 3 S. Tringali, R. La Rosa, *San Biagio d'Amiternum. Intervento di ricostruzione e restauro*, L.C.T., Ispica, 2012.
- 4 S. Tringali, R. La Rosa, E. Raglione, *Aggregato San Giuseppe Artigiano. L'Aquila, Intervento di ricostruzione e restauro*, L.C.T., Ispica, 2022.
- 5 Archivio Sintecna s.r.l., *Progetto di restauro della chiesa di San Biagio Amiterno nel centro storico dell'Aquila*, 2012.
- 6 Le Chiese delle Diocesi Italiane, Chiesa di San Giuseppe Artigiano. <https://chieseitaliane.chiesacattolica.it/chieseitaliane/schedacc.jsp?sinteticabool=true&sintetica=true&sercd=1455#>, u.c. gennaio 2024.

4. Chiesa di San Giuseppe Artigiano scheda sintetica



Localizzazione

42°20'59.1"N 13°23'48.4"E
Via Sassa 1
67100, L'Aquila (AQ)

Prima fondazione | La chiesa sorge sul precedente edificio religioso risalente alla metà del XIII secolo consacrato a San Vittorino, che presentava un diverso orientamento rispetto all'attuale, con l'asse principale orientato in direzione est-ovest. A seguito del sisma del 1315, la chiesa fu ricostruita con impianto ruotato, a monoaula e venne intitolata a San Biagio d'Amiternum, come testimonia l'affresco situato nell'abside rinvenuta durante gli interventi di restauro condotti nel 2006. Durante la citata campagna di restauro, sono emersi diversi elementi appartenenti alle varie fasi storiche della chiesa: strutture murarie sottofondali, che testimoniano la presenza di muri trasversali rispetto all'attuale andamento, e pilastri ottagonali risalenti al XIV secolo, probabilmente appartenenti all'impianto primigenio della chiesa. Nel 1349, la chiesa viene nuovamente ricostruita a seguito di un altro terremoto. Solo dopo il terremoto del 1703, l'edificio, risultato irrecuperabile, venne ricostruito secondo l'odierna configurazione. A questo periodo risale anche la realizzazione dell'adiacente Oratorio di San Giuseppe dei Minimi.

Trasformazioni | Del periodo immediatamente successivo all'ultima ricostruzione risalente al XVIII secolo, non si hanno informazioni relative a ulteriori modifiche di carattere tecnico-costruttivo ma solo di natura funzionale. Nel 1819, la chiesa fu concessa alla confraternita di San Giuseppe dei Minimi ma venne sconsacrata e adibita ad altre funzioni.

Durante gli anni '70 del novecento è stata condotta una campagna di restauro che ha modificato il sistema strutturale dell'edificio di culto. Alla originaria struttura lignea è stata appoggiata, nella navata centrale e nella navata laterale destra, una copertura in laterocemento ed è stato, realizzato anche un cordolo perimetrale in cemento armato.

Nel 2008 venne riaperta al culto come chiesa universitaria consacrata a San Giuseppe Artigiano. L'edificio, gravemente danneggiato a seguito del sisma del 2009, è stata interessata da interventi di restauro e di adeguamento sismico tra il 2011 e il 2012, dopo i quali è stato riaperto al pubblico. Nel 2013, la chiesa è stata elevata al rango di Basilica Minore.

Note tipologiche e costruttive | L'edificio fa parte di un compatto aggregato nel centro storico della città, in particolare presenta edifici in adiacenza lungo entrambi i fianchi. L'impianto è basilicale a tre navate e triabsidato, con transetto non sporgente ed ingresso in asse. La facciata a salienti presenta un secondo ordine incompiuto; inferiormente, si presenta tripartita da paraste e caratterizzata da tre portali in pietra. La navata principale, di luce maggiore rispetto alle due laterali, è coperta da una volta a botte lunettata in camorcanna, con struttura portante lignea, ancorata alle capriate sovrastanti mediante un sistema composto da elementi lignei e funi in acciaio. Come precedentemente accennato, sopra le strutture lignee della navata centrale è presente una copertura in laterocemento. Le navate laterali presentano, invece, sistemi voltati caratterizzanti le singole campate, che si configurano come cupole ribassate impostate su pianta quadrata mediante pennacchi; si differenziano le volte delle campate in corrispondenza dei bracci del transetto, che si presentano come cupole leggermente ribassate impostate su pianta ellittica, che sostengono le lanterne sovrastanti. Tutti i sistemi voltati sono realizzati con blocchi laterizi posati di coltello e caratterizzati da costolonature in mattoni. Relativamente al sistema di copertura delle navate laterali, in

quella sinistra è ancora presente la struttura lignea a semi-capriate che in alcuni punti poggia sulle volte sottostanti; nella navata destra sono presenti travi in semplice appoggio con copertura in laterocemento sovrastante.

In generale, la qualità muraria costruttiva ed esecutiva riscontrata nei vari elementi è di buona fattura.

Interpretazione del danno | Dopo l'evento sismico, la chiesa ha subito un danneggiamento diffuso, più rilevante nelle finiture superficiali che negli elementi strutturali. Le strutture murarie sia verticali che orizzontali, infatti, non hanno evidenziato particolari vulnerabilità grazie alla qualità tecnico-costruttiva.

I danni riconducibili all'impulso in direzione longitudinale del sisma sono numerosi e più evidenti: presentando edifici adiacenti su entrambi i fianchi, l'edificio non ha, infatti, subito danni rilevanti dovuti a un movimento trasversale. Il cinematismo più facilmente riconoscibile è quello legato al movimento di ribaltamento della porzione sommitale della facciata principale, unico elemento dell'edificio interessato da un importante crollo. In particolare, è possibile che il cinematismo sia stato aggravato dalla carente connessione poco adeguata tra la struttura portante muraria verticale e la copertura in cemento armato. Relativamente alle pareti longitudinali della navata, è possibile osservare numerose lesioni di taglio dall'inclinazione ricorrente (estese generalmente dalle chiavi degli archi di separazione delle navate sottostanti agli angoli delle finestre poste sopra la cornice). I pilastri presentano un quadro fessurativo diffuso, con sconnessioni degli elementi lapidei di rivestimento dei basamenti.

L'impulso in direzione longitudinale ha presumibilmente provocato una traslazione rigida della navata centrale, la cui volta è stata interessata solo da limitati crolli di piccola entità, e la deformazione delle campate laterali, che ha portato alla formazione di lesioni nelle volte, ortogonalmente alle diagonali che, alternativamente, esibiscono movimenti estensivi. Le lesioni presentano un andamento circonferenziale, coerente con il modo di vibrare torsionale delle cupole. Esse possono essere altresì giustificate dalla discontinuità di rigidità tra le strutture di elevazione con i pennacchi e le cupole stesse.

È possibile, infine, osservare lesioni meno pronunciate nella navata destra, in corrispondenza della quale la parete di facciata, che è ribaltata asimmetricamente, è più massiccia, e in prossimità dell'abside, dove il movimento è stato minore.

Intervento post sisma | Gli interventi condotti per l'adeguamento sismico della chiesa hanno interessato prevalentemente il sistema di copertura, la facciata principale, i pilastri e le volte delle navate laterali, oltre a interventi volti a migliorare il comportamento globale dell'organismo rispetto a meccanismi fuori piano.

Relativamente al sistema di copertura, nella navata centrale e in quella laterale destra sono state rimosse le aggiunte in laterocemento, ripristinando l'efficienza statica dell'originaria struttura lignea, consolidando gli elementi esistenti o sostituendoli in caso di avanzato degrado (in particolare nella navata destra le travi in semplice appoggio sono tutte di nuova realizzazione) e irrigidendo i nodi costruttivi. Nella volta in camorcanna della navata centrale, sono stati consolidati, o, laddove necessario, sostituiti gli elementi lignei che compongono i costoloni della volta e ripristinato il sistema di pendagliatura connesso alle catene delle capriate sovrastanti, integrate con tiranti metallici che collegano i puntoni alla catena, per limitarne la flessione. Per migliorare il collegamento tra la copertura e le pareti perimetrali della navata principale, sono stati previsti alcuni presidi, come l'impiego di piastre metalliche. La struttura di copertura della navata laterale sinistra è stata, invece, completamente rimossa e sostituita da capriate a catena metallica rialzata di nuova realizzazione, per consentire di superare la quota delle volte. Tutti i piani di falda sono stati irrigiditi mediante l'inserimento di un sistema di controventatura, realizzato con piatti in acciaio. Relativamente ai sistemi voltati, l'intervento ha previsto la disposizione di fasce in fibra di carbonio sull'estradosso delle costolonature.

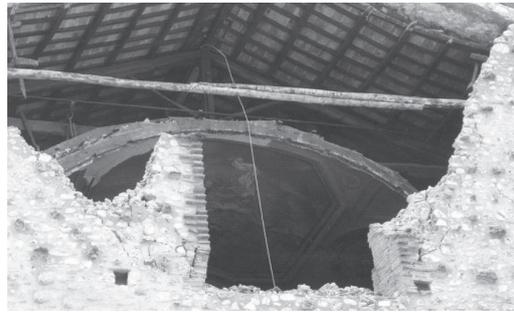
Alla testa delle pareti laterali della navata centrale e di quella laterale destra, il precedente cordolo in c.a. è stato sostituito con un elemento continuo in muratura armata e sono stati disposti due livelli di incatenamenti, per contrastare il meccanismo di ribaltamento della facciata principale.

Infine, sono stati eseguiti interventi relativi ai pilastri interni di separazione tra le navate, che presentavano un diffuso quadro fessurativo, principalmente alla base degli stessi, dove sono state inserite cerchiature in barre d'acciaio filettate; per il fusto intonato sono state, invece, impiegate fasce in fibra di carbonio e iniezioni di miscela a base di malta di calce idraulica.



Fonti

Prospetto principale
esposto a nord est. **5**



Viste all'intradosso e
all'estradosso della
volta a botte lunettata
della navata centrale
in camorcanna, con
struttura portante
lignea. **5**

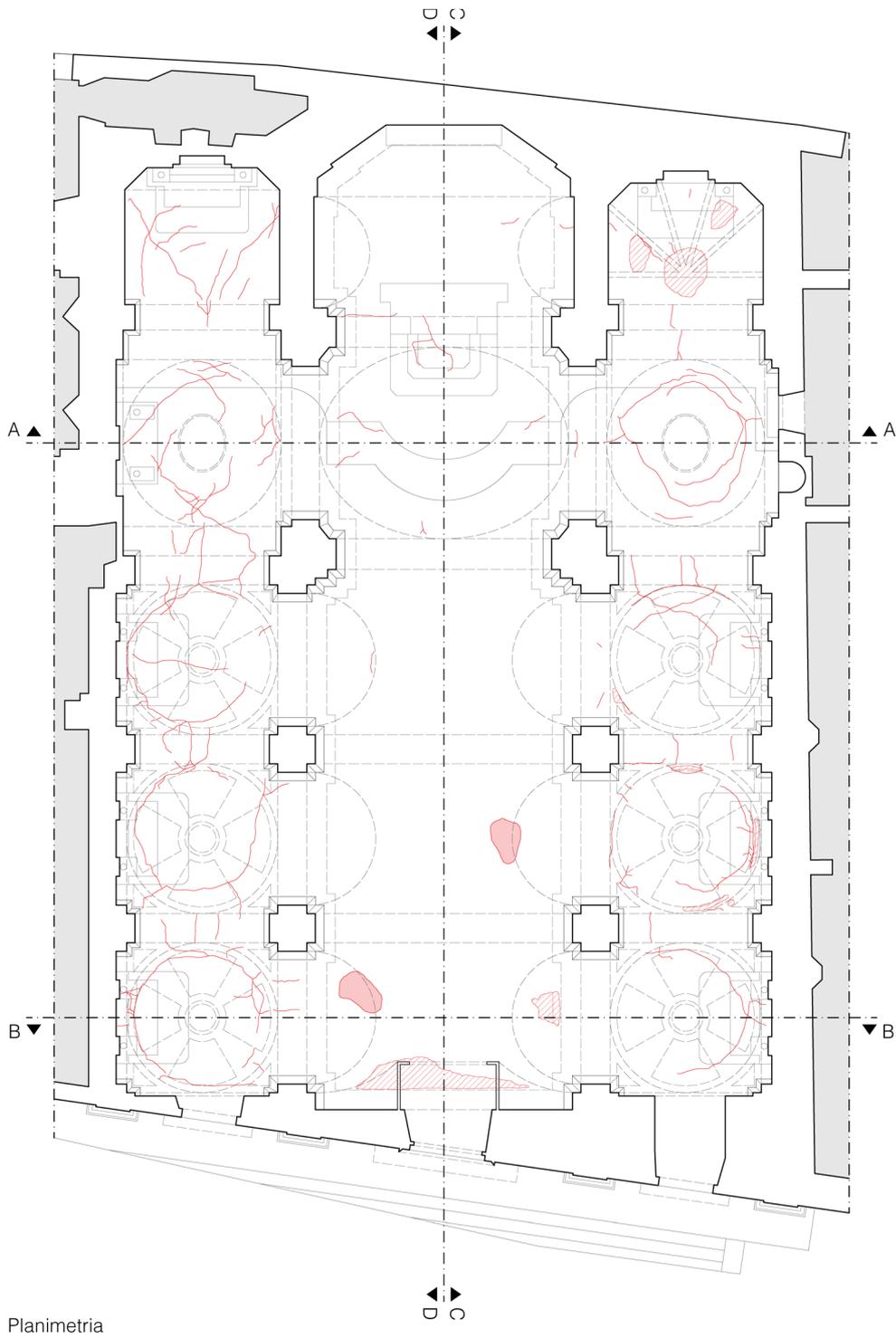


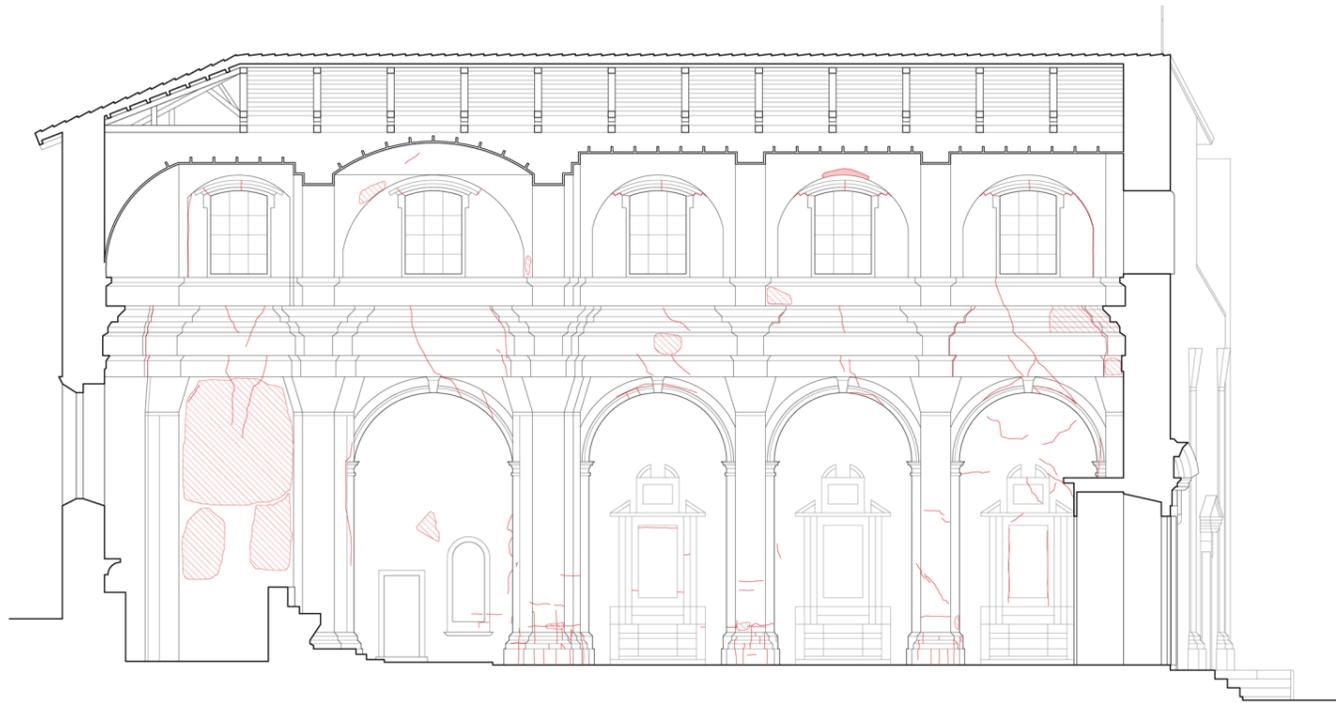
Viste all'intradosso e
all'estradosso delle
volte a vela ribassate
delle navate laterali
realizzate in lateri-
zio. **5**



Il prospetto principale
e gli interni della chie-
sa dopo l'intervento di
restauro concluso nel
2012. **5**

4. Chiesa di San Giuseppe Artigiano rilievo del danno, 1:200

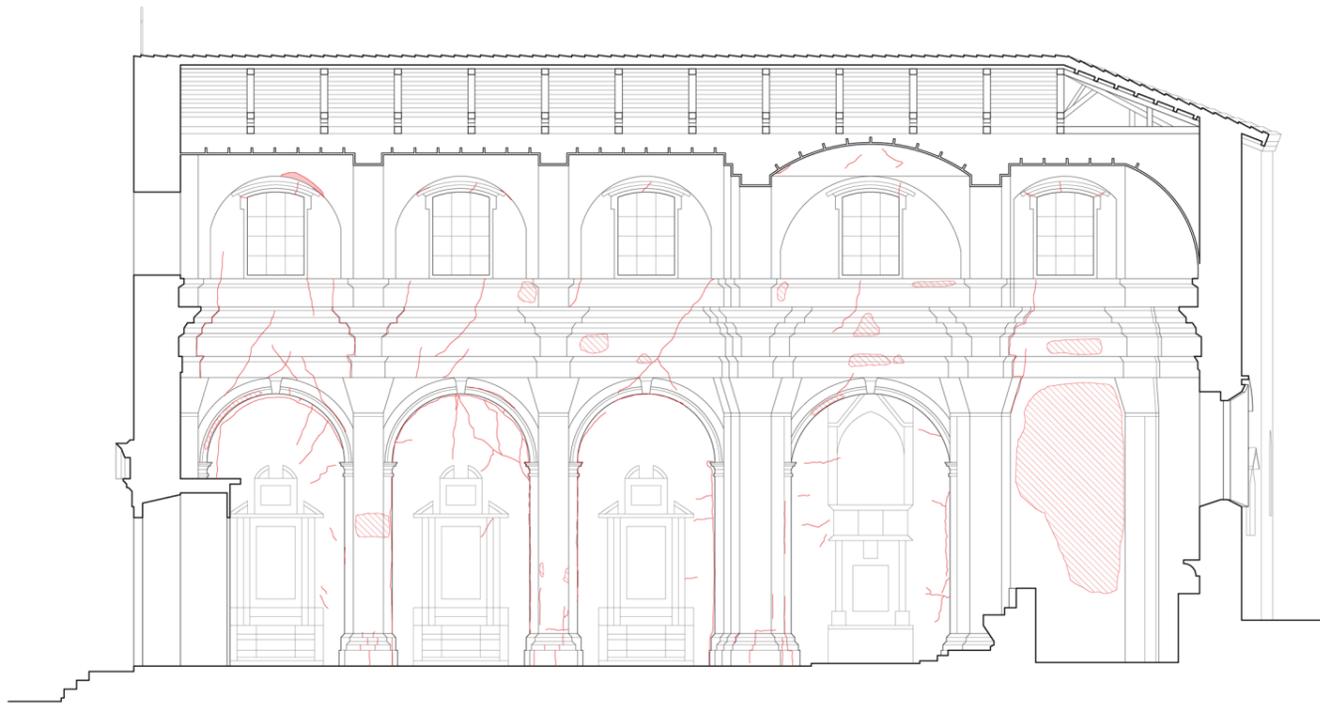




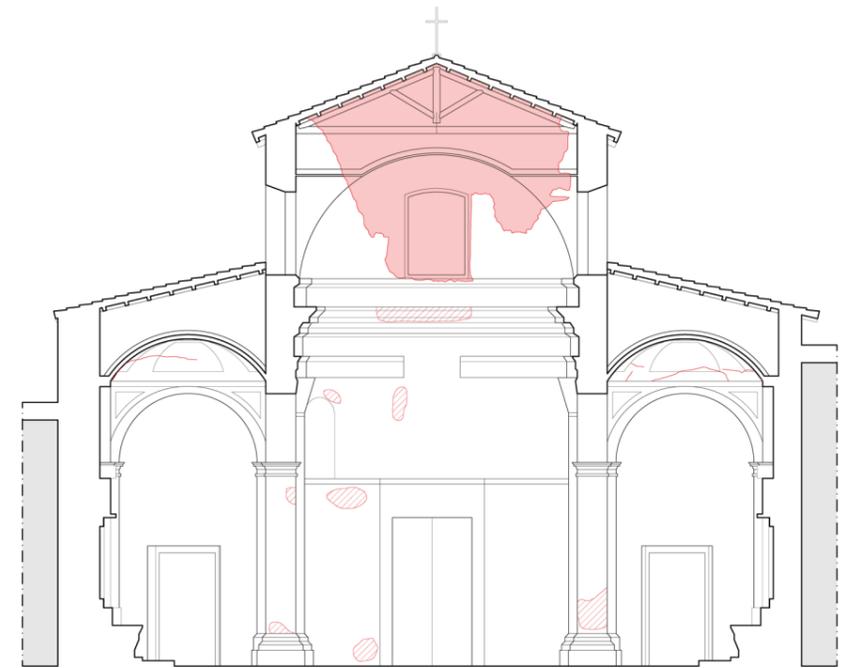
Sezione CC



Sezione AA



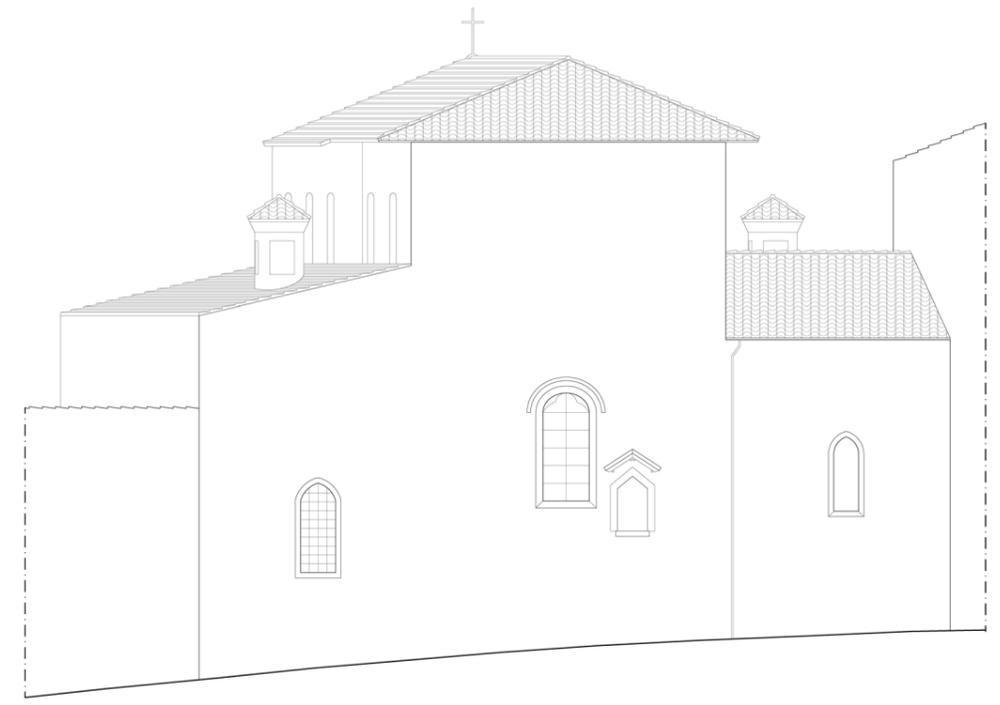
Sezione DD



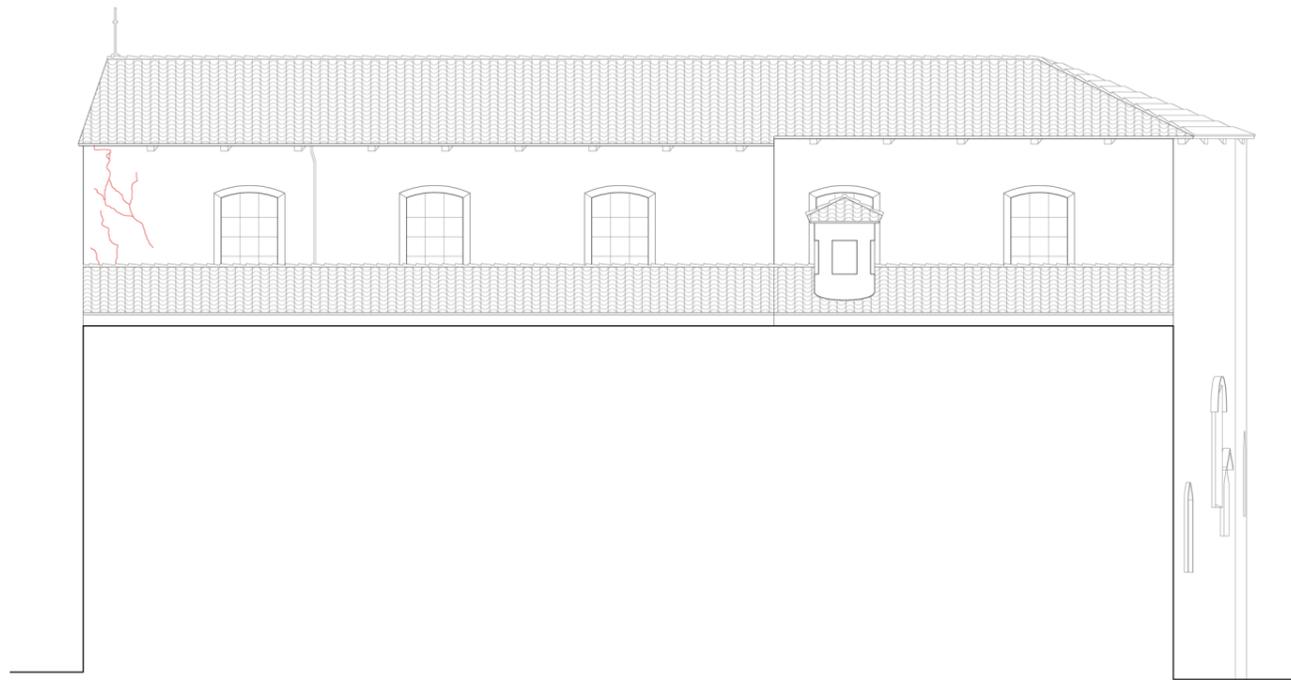
Sezione BB



Prospetto nord ovest



Prospetto sud ovest

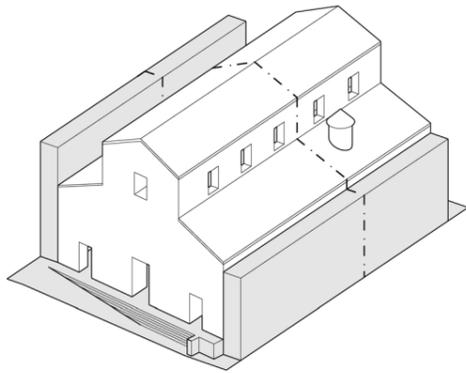


Prospetto sud est



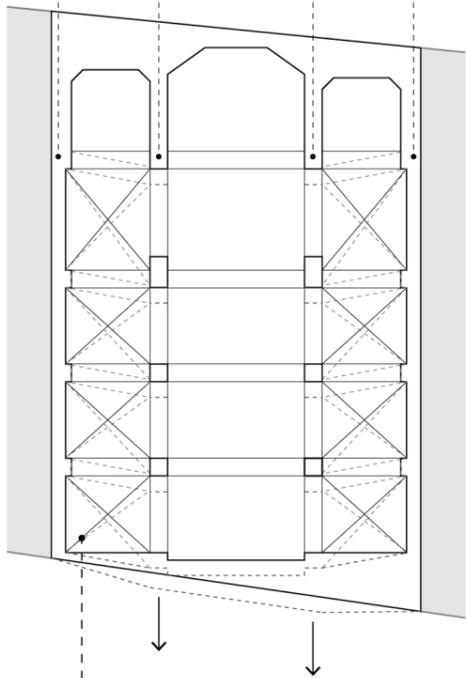
Prospetto nord est

4. Chiesa di San Giuseppe Artigiano interpretazione del danno e cinematismi ●●●



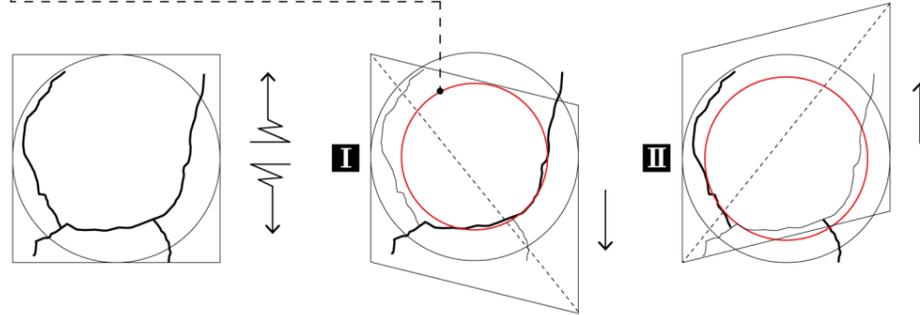
1 L'impulso in direzione longitudinale provoca un movimento relativo tra i **pareti A e B** e tra i **pareti D e C**. Il movimento di B e C, strutture di separazione tra la navata centrale e le laterali, comporta la traslazione rigida della prima e la deformazione delle seconde, vincolate esternamente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

A B C D



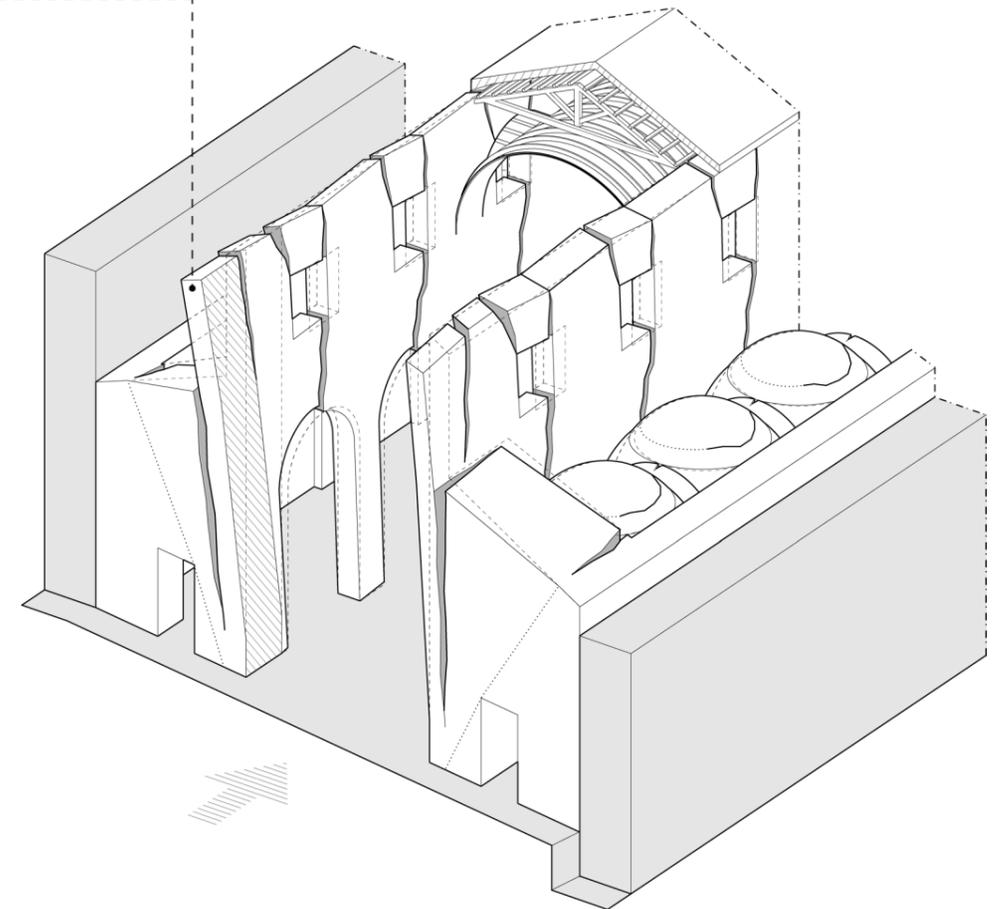
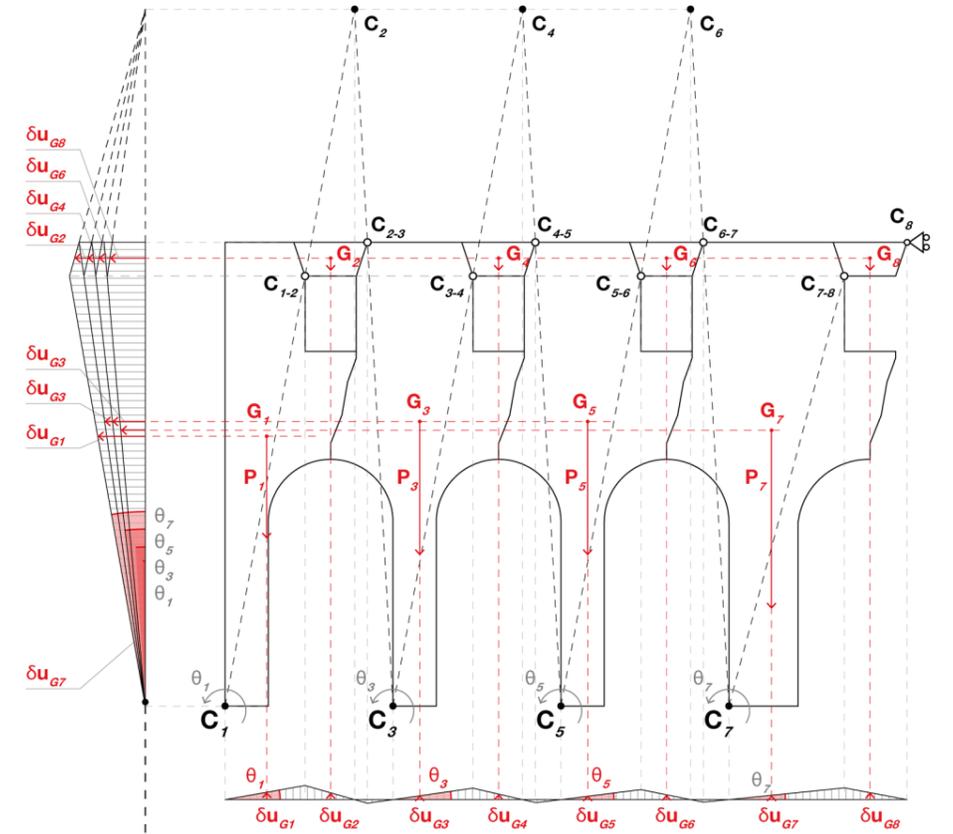
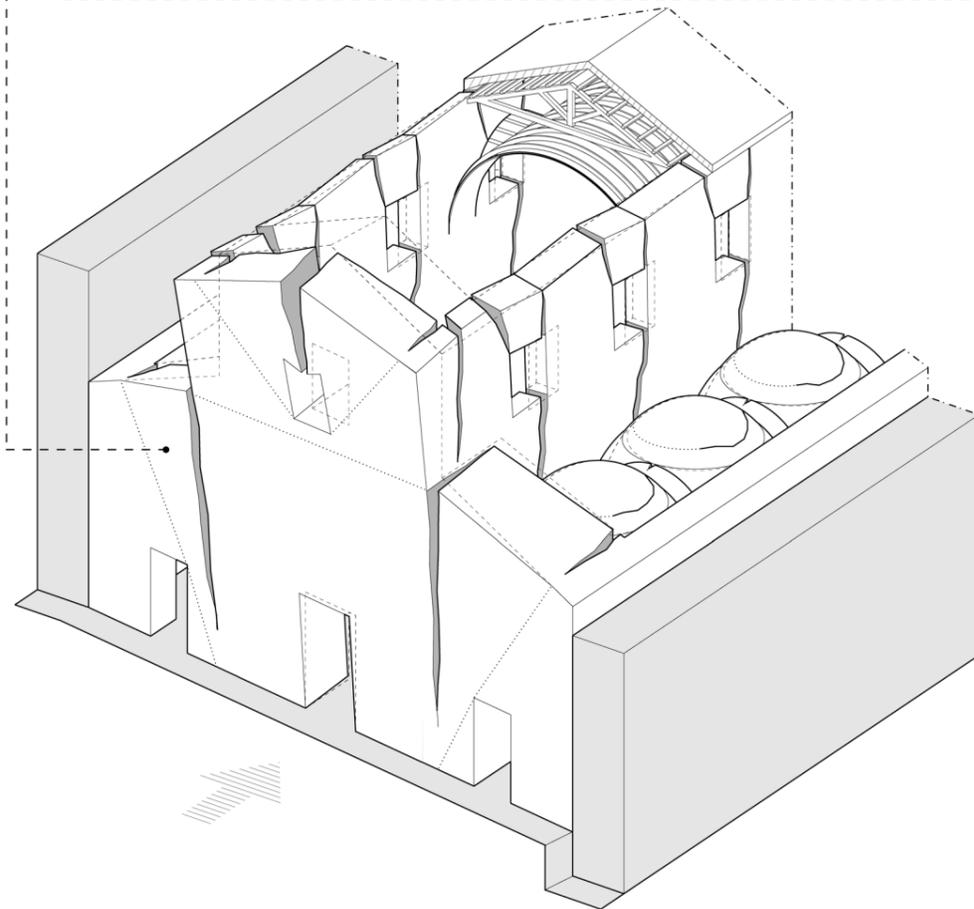
2 Il meccanismo sopra descritto provoca lo **scorrimento nel piano orizzontale delle volte** nelle campate laterali, con la comparsa di lesioni ortogonali alla diagonale che esibisce un movimento estensivo.

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 circolare**, 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 ($\theta_1 > \theta_3 > \theta_5 > \theta_7$).



Convenzioni grafiche

Rilievo del danno

- fessurazione
- ▨ distacco superficiale
- crollo

Interpretazione del danno e cinematismi

- posizione indeformata
- asse di rotazione
- - - linea di sezione
- superfici lesionate
- ▨ superfici sezionate
- contesto
- ☳ direzione del moto del suolo

Grado di affidabilità dei meccanismi

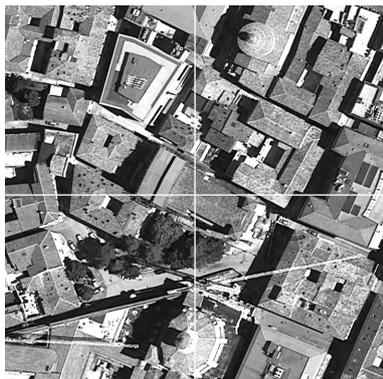
- scarsa presenza di fonti
- discreta presenza di fonti
- consistente presenza di fonti

Chiesa di San Marco

Fonti

- 1 L. Binda, P. Condoleo, J. Magi, B. Silva, M. R. Valluzzi, *Chiesa di San Marco – L'Aquila*, Politecnico di Milano – Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, 2009.
- 2 M. Carraro, T. Ghedina, A. De Sabbata, C. Modena, F. Casarin, M. Dalla Benetta, *The S. Marco Church in L'Aquila: provisional Interventions after the 2009 Abruzzo Earthquake*, «Advanced Materials Research», 133-134, 2010, pp. 953-958.
- 3 Y. Endo, L. Pelà, P. Roca, F. da Porto, C. Modena, *Comparison of seismic analysis methods applied to a historical church struck by 2009 L'Aquila earthquake*, «Bulletin of Earthquake Engineering», 13, 2015, pp. 3749-3778.
- 4 Le Chiese delle Diocesi Italiane, Chiesa di San Marco. <https://chieseitaliane.chiesacattolica.it/chieseitaliane/schedacc.jsp?sintecabool=true&sintetica=true&sercd=1163#>, u.c. gennaio 2024.

5. Chiesa di San Marco scheda sintetica



Localizzazione

42°20'52.2"N 13°23'51.0"E
Via Neri 2,
67100, L'Aquila (AQ)

Prima fondazione | La chiesa viene realizzata nella seconda metà del XIII secolo su iniziativa degli abitanti. Originariamente, l'impianto era ad aula unica rettangolare e presentava i medesimi limiti perimetrali dell'odierna chiesa. Dell'edificio originale si conserva il basamento visibile nei due prospetti laterali.

Trasformazioni | Il primo intervento di ricostruzione massivo risale probabilmente al 1315, quando la chiesa, a seguito del sisma, riportò ingenti danni. Tra il XV e il XVI secolo, la fabbrica fu oggetto di numerosi cantieri, durante i quali vennero realizzati la facciata, il fianco nord e alcune delle cappelle laterali. Ma è con il sisma del 1703 che la chiesa, gravemente danneggiata, viene completamente riprogettata intorno al 1750. A questo intervento risale la realizzazione delle due torri campanarie e della parte sommitale della facciata.

Intorno agli anni '20 del novecento, venne avviato un intervento di ridefinizione dell'adiacente piazza della Prefettura, che determinò l'attuale sistemazione della fiancata sud; in particolare, venne sostituito il preesistente portale barocco con uno ogivale, risalente al XIV secolo, e, conseguentemente, le aperture sovrastanti vennero modificate assumendo la forma ogivale trilobata.

Nonostante la chiesa abbia subito, nel corso dei secoli, importanti trasformazioni, gli interventi che maggiormente ne hanno compromesso l'integrità tecnica-costruttiva sono quelli realizzati negli ultimi cinquant'anni.

Nel 1970 la chiesa subisce un intervento fortemente invasivo, causato dalla totale sostituzione della copertura lignea con travetti prefabbricati e tavelloni in laterizio, con tiranti in corrispondenza di ogni travetto. Viene inoltre realizzato un box in c.a., composto da due coppie di travi e timpani, in corrispondenza del presbiterio, che grava sulle pareti perimetrali e sui quattro arconi di sostegno della volta. Inoltre, in occasione di questi interventi, vennero effettuati dei tagli nei frenelli della volta, in corrispondenza dei muri laterali, compromettendo la loro funzione.

Anche gli interventi condotti nel 2005 hanno interessato la componente strutturale e architettonica della chiesa. Tutta la superficie di copertura della chiesa è stata impermeabilizzata e isolata termicamente. Le facciate, che presentavano un diffuso degrado, sono state interessate da interventi di restauro volti anche al miglioramento della collaborazione tra il paramento esterno (ben realizzato con blocchi squadrati) e quello interno (irregolare) mediante iniezioni. Riguardo gli interventi strutturali, sono state sostituite la copertura lignea delle torri campanarie e le catene di contenimento, con un'analoga struttura lignea con nuovi sistemi di ancoraggio metallici.

Nel 2007 gli interventi hanno interessato principalmente la zona presbiteriale della chiesa, in particolare gli arconi di sostegno della volta sono stati rinforzati all'intradosso con fibre e fiocchi di carbonio e all'estradosso con iniezioni, per far fronte all'aumento di carico dovuto al box in ca sovrastante.

A seguito del sisma del 2009, la chiesa è stata dichiarata inagibile ma i previsti interventi nel 2020 non sono ancora iniziati.

Note tipologiche e costruttive | La chiesa sorge nel centro storico ed è contigua, nella parte absidale, da edifici realizzati in adiacenza. L'impianto è ad unica navata con tre cappelle per lato, definite dall'uso

della travatura ritmica. La navata, coperta con volta a botte, è seguita dalla zona presbiteriale che presenta una volta a vela ribassata su pennacchi, impostata su pianta ellittica. Il transetto presenta uno sviluppo contenuto, senza sporgere rispetto ai muri perimetrali. L'abside terminale è semicircolare e sormontata da catino absidale. La struttura di copertura della chiesa risale, come già detto, all'intervento del 1970.

La volta a botte della navata è composta da un sistema misto: sei archi in muratura definiscono cinque campate coperte da volte in camorcanna. Gli archi sono realizzati con blocchi laterizi di dimensioni 29x15x3 cm posti di taglio, e presentano tiranti lignei all'estradosso; il rinfianco è realizzato con muratura mista di pietra e mattoni apparecchiati ordinatamente.

Anche la volta presbiteriale e gli arconi di sostegno sono realizzati con i medesimi blocchi, disposti alternativamente di fascia e di testa negli archi e posati di piatto e disposti secondo file ad anelli concentrici nella volta, a eccezione del tondo centrale, dove i blocchi sono posti di testa.

Le cappelle laterali sono voltate a botte, con volte in muratura mista pietra e laterizio e rinfianchi disomogenei, realizzati con materiale di risulta. La volta in corrispondenza dell'ingresso laterale è realizzata principalmente in pietra. La semicupola dell'abside, fortemente danneggiata, sembra essere costituita da conci di pietra misti a laterizio.

Tutti i muri laterali sembrano essere costituiti da più paramenti non bene ammortati tra loro, a causa delle varie fasi costruttive susseguitesesi nell'arco dei secoli.

Interpretazione del danno | Il danno riscontrato nella chiesa è di grave entità.

Relativamente ai cinematismi attivati dall'impulso in direzione longitudinale del sisma, il ribaltamento della facciata ha comportato danni contenuti; il movimento che interessa la parte sommitale della facciata è dovuto presumibilmente al martellamento della trave di colmo, che ha comportato il crollo della porzione sovrastante l'apertura.

I cinematismi attivati dall'impulso in direzione trasversale sono senza dubbio di maggiore entità. Osservando il corpo della facciata, è possibile riconoscere lesioni passanti di taglio. La risposta trasversale dell'aula è il meccanismo più severo; a questo è dovuto il crollo della parte superiore della muratura del fianco sinistro. La localizzazione del crollo è dovuto sia al maggior impulso del sisma in direzione nord-sud che a un dettaglio costruttivo: la quota di gronda delle cappelle del lato sinistro è inferiore rispetto a quello del fianco opposto; questo ha comportato una maggiore snellezza della parete superiore rispetto alla corrispondente sul fianco destro e quindi una maggiore vulnerabilità rispetto ai movimenti fuori piano. Ciò ha determinato il cedimento del supporto sinistro, con conseguente collasso degli archi della volta a botte della navata. Anche le lesioni alla base dei pilastri sono dovute al movimento trasversale dell'aula, così come quelli in corrispondenza delle arcate. Esternamente, le lesioni che corrono parallelamente alla linea di gronda testimoniano il movimento relativo tra copertura e pareti longitudinali.

Relativamente al crollo degli arconi lungo la navata, il cinematismo che ha portato al loro collasso è quello sopra esposto; nel caso dell'arcone di separazione tra aula e presbiterio, probabilmente i rinforzi precedentemente descritti (iniezioni all'estradosso, rinforzi in carbonio all'intradosso) non sono stati in grado di rispondere positivamente; in particolare, il timpano in ca sopra realizzato – in parte anche con la funzione di stabilizzante in condizione statica – ha concorso in maniera importante al crollo (a causa della rotazione rigida a cui è sottoposto in condizione dinamica).

Anche nel presbiterio sono visibili lesioni riconducibili al movimento trasversale della chiesa (ribaltamento delle pareti del transetto, lesioni diffuse nelle volte a botte laterali, lesioni passanti in corrispondenza degli archi di sostegno alla volta) e probabilmente aggravati dalla presenza dell'anello sommitale in c.a. che ha, inoltre, prodotto lesioni nella volta a vela presbiteriale non compatibili con quelle tipicamente osservabili.

Riguardo all'esteso quadro fessurativo rilevabile nell'abside, il cinematismo che ha provocato più danni è il ribaltamento delle pareti, che ha interessato solo la parte sommitale delle stesse a causa della presenza di edifici di minore altezza che hanno limitato i movimenti alla base dell'abside, come testimoniato dal crollo nel fianco destro.

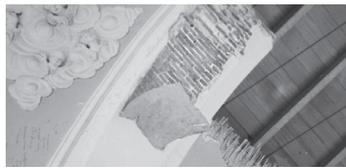


Fonti

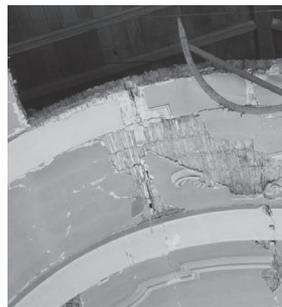
Prospetto principale esposto a est e prospetto laterale esposto a nord. **1**



Viste interna ed esterne del crollo del fianco sud. **1**



Volta a vela ribassata presbiteriale con il box in c.a. sovrastante e dettaglio del rinforzo in fibre di carbonio distaccate dall'intradosso degli archi di sostegno della volta dopo il sisma. **1**

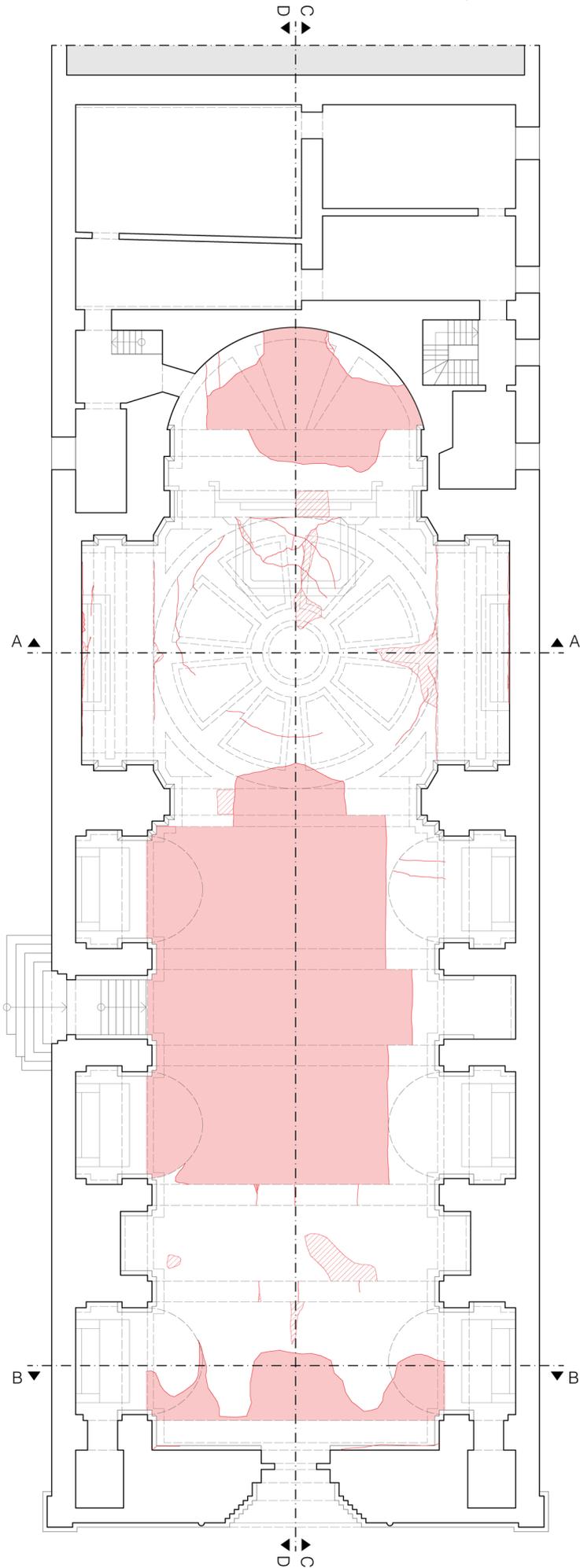


Struttura di copertura della navata centrale in travetti prefabbricati in c.a. e manto in tavelloni laterizi. **1**



Ribaltamento e crollo dell'abside. **1**

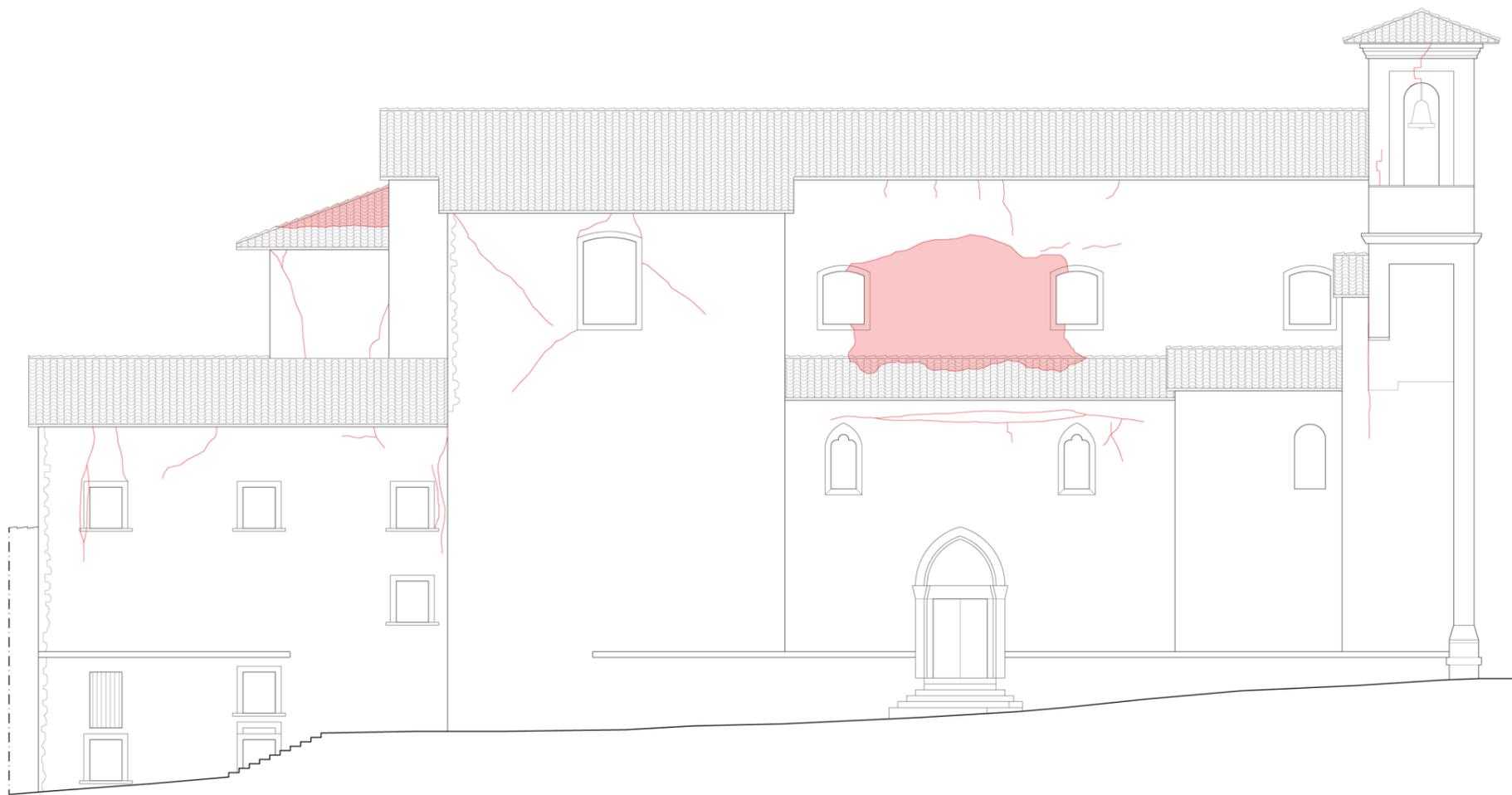
5. **Chiesa di San Marco** rilievo del danno, 1:200



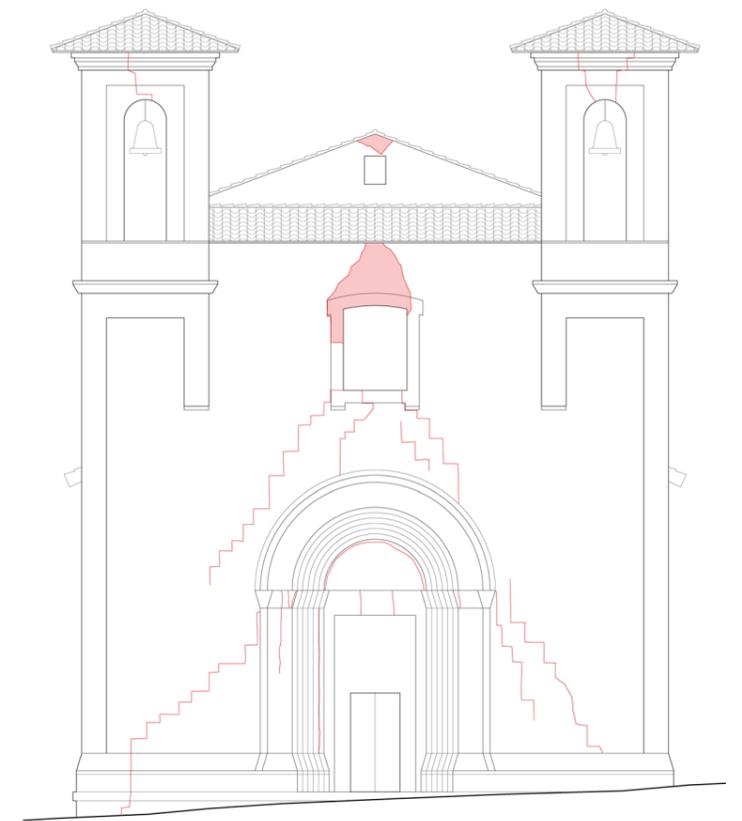
Planimetria



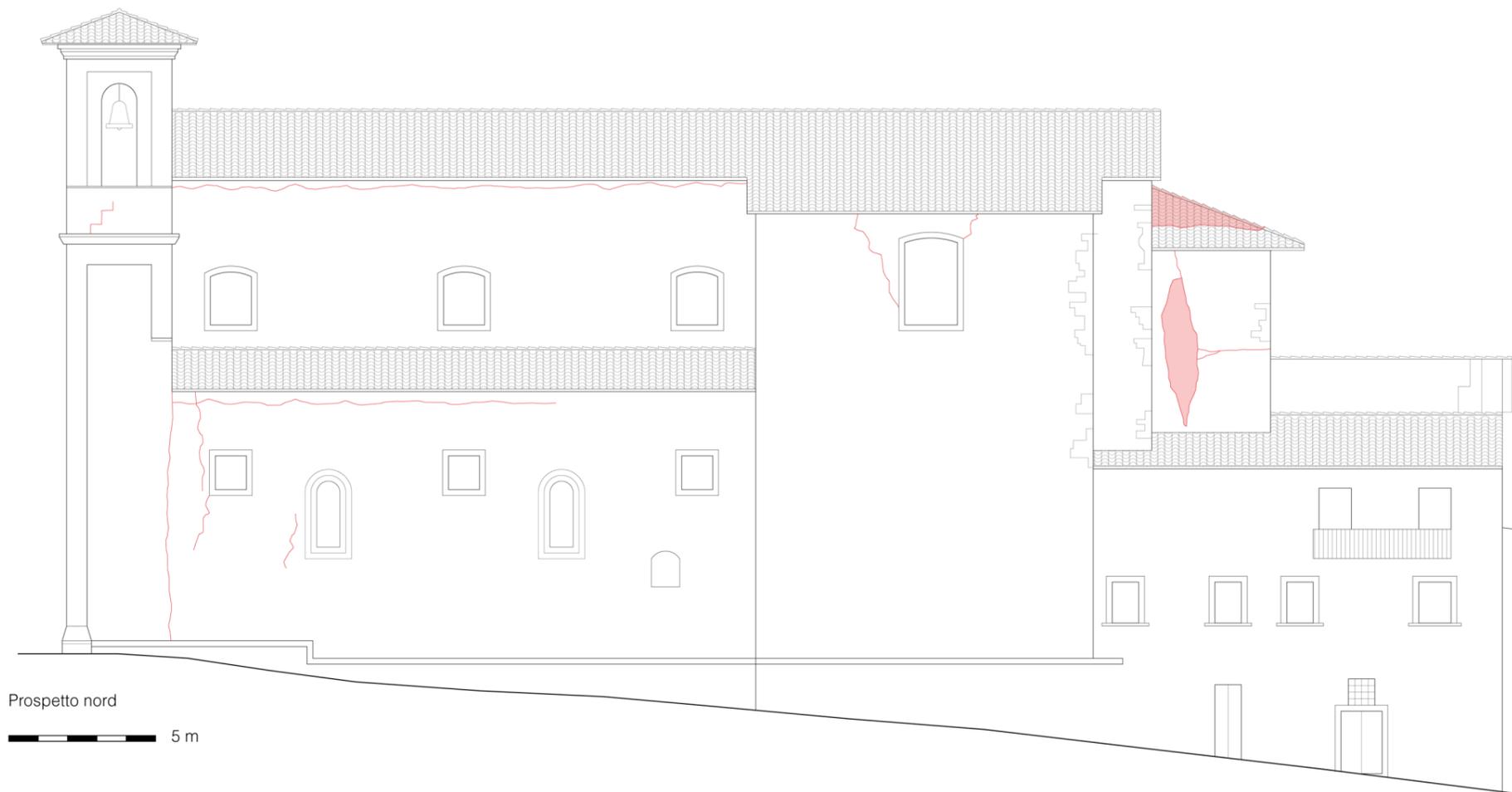
5 m



Prospetto sud

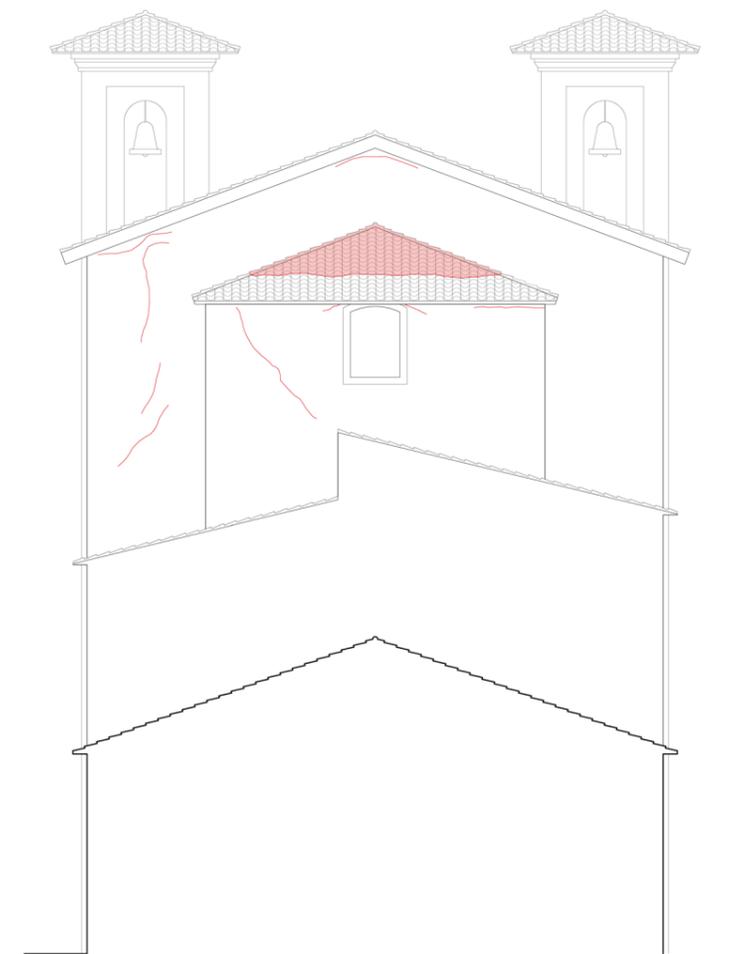


Prospetto est

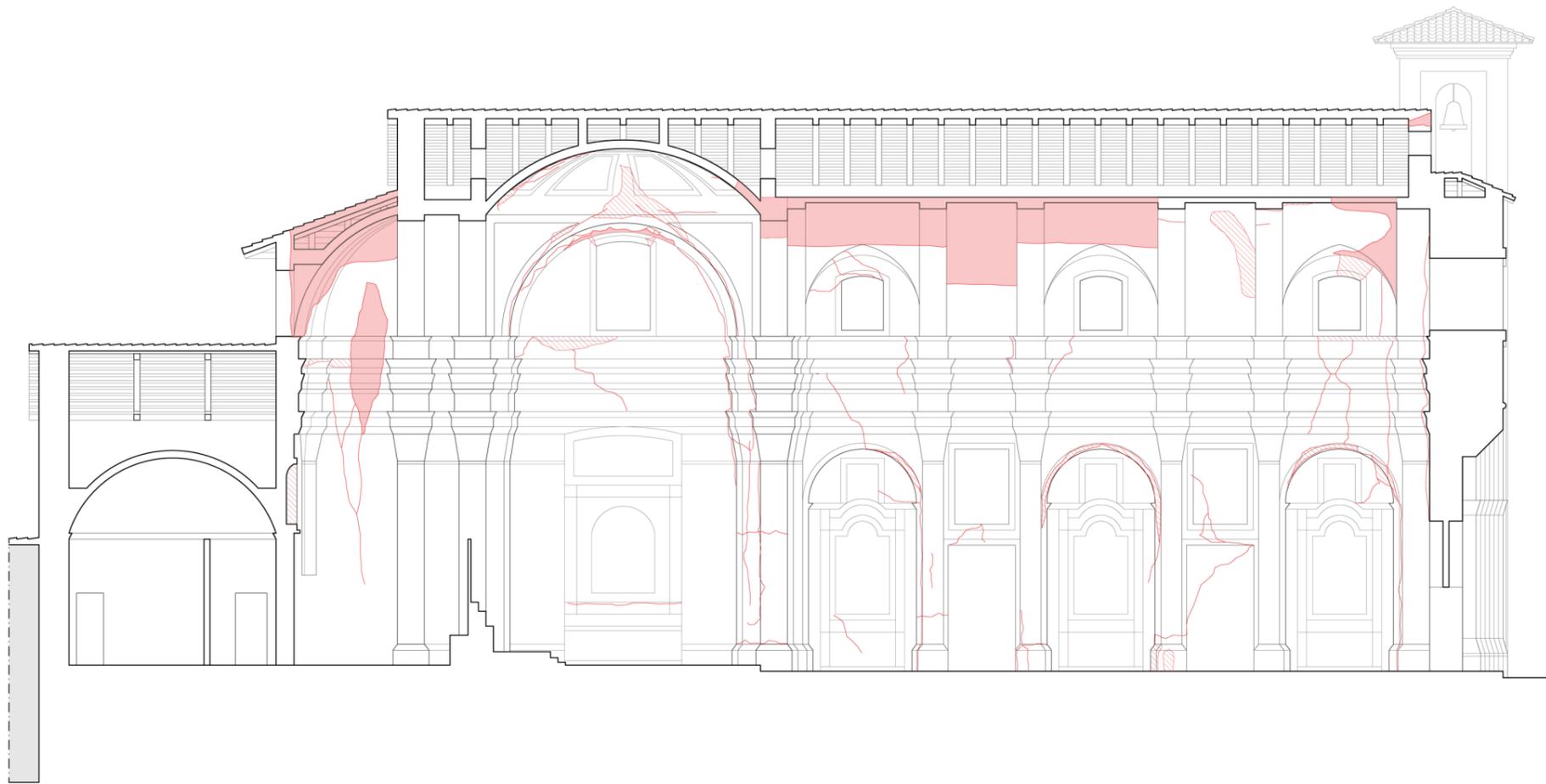


Prospetto nord

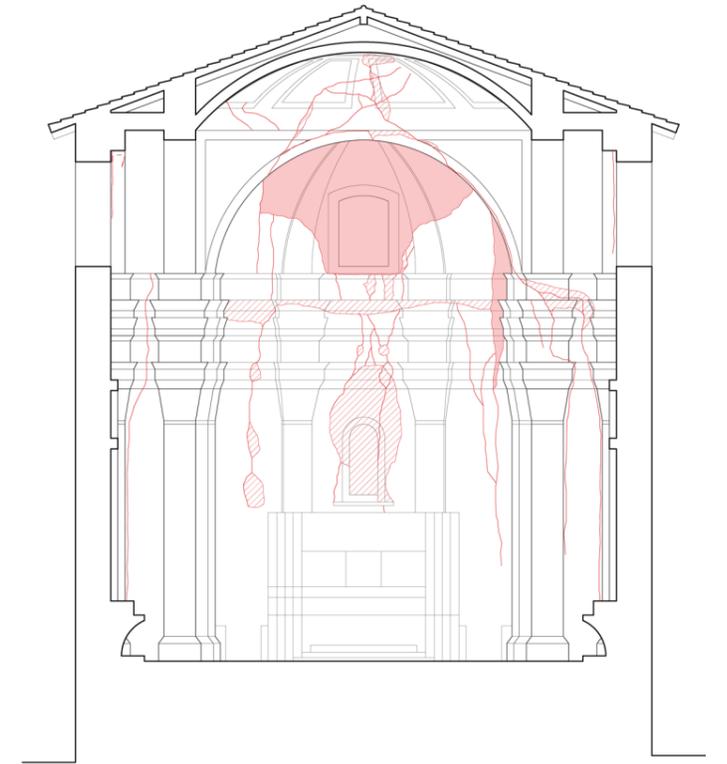
5 m



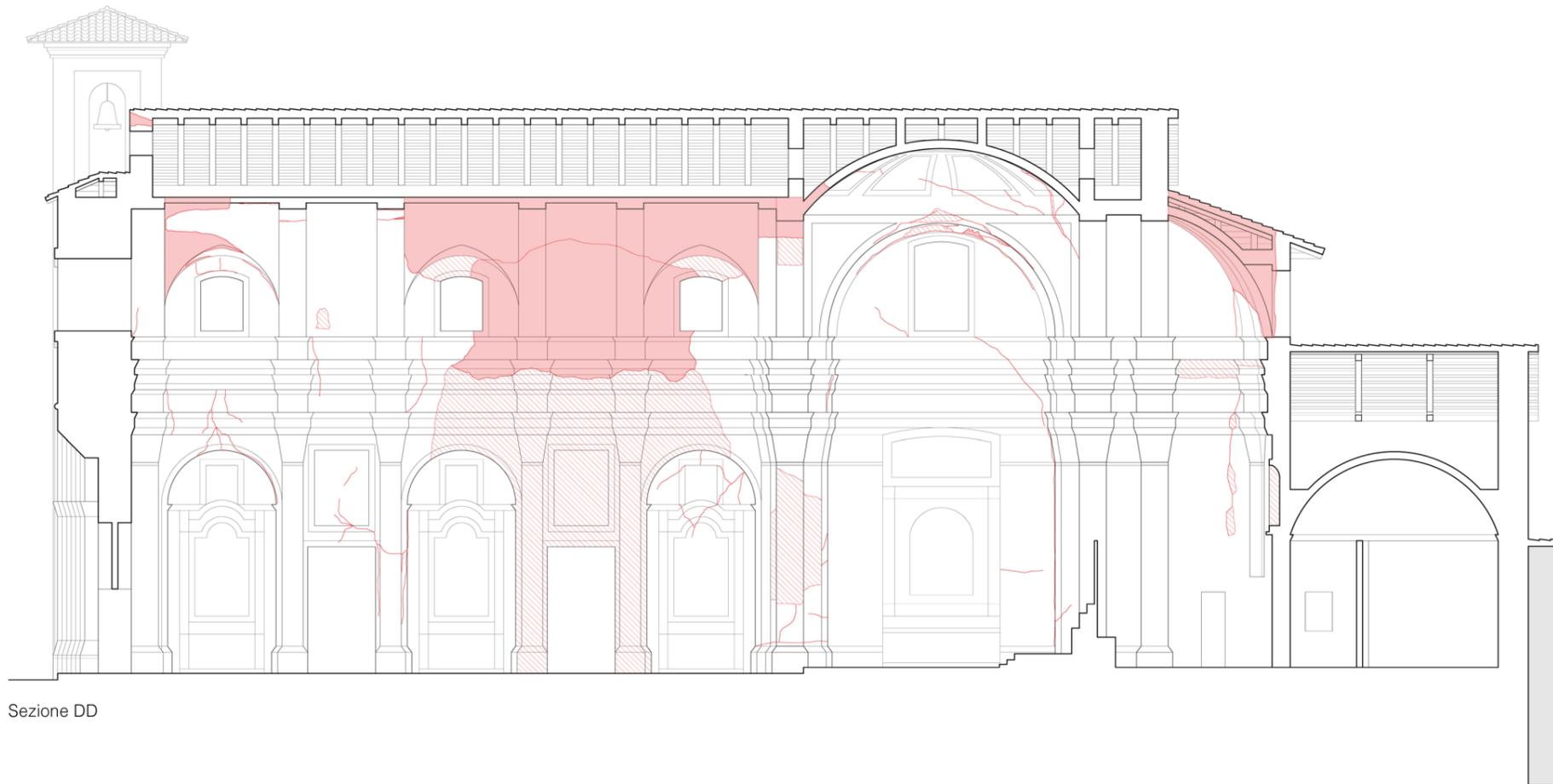
Prospetto ovest



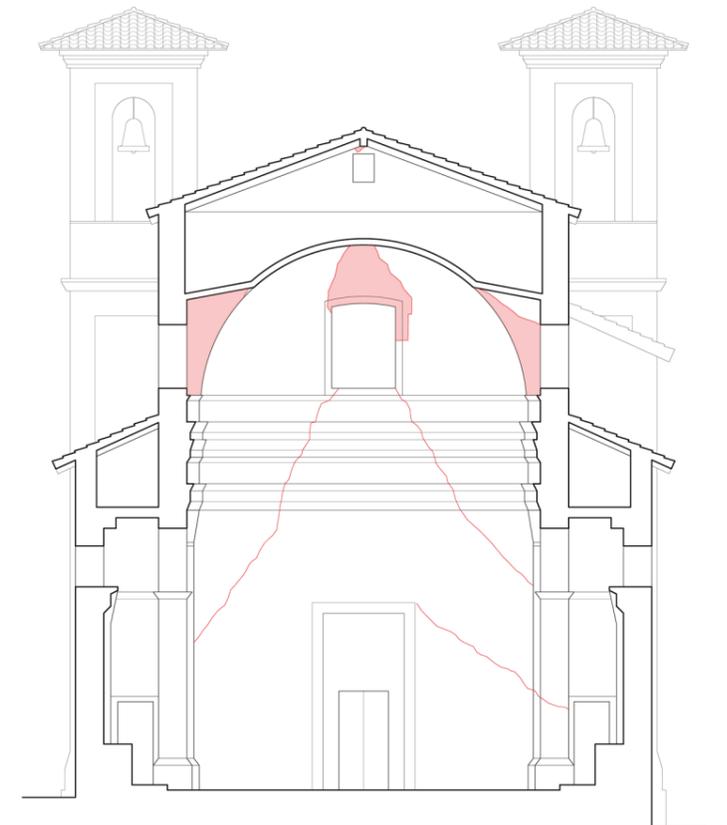
Sezione CC



Sezione AA



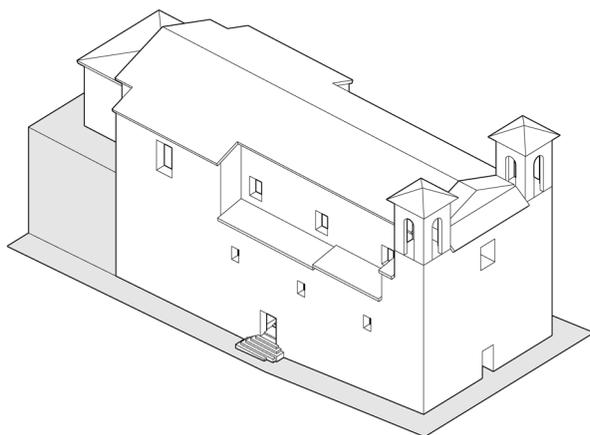
Sezione DD



Sezione BB

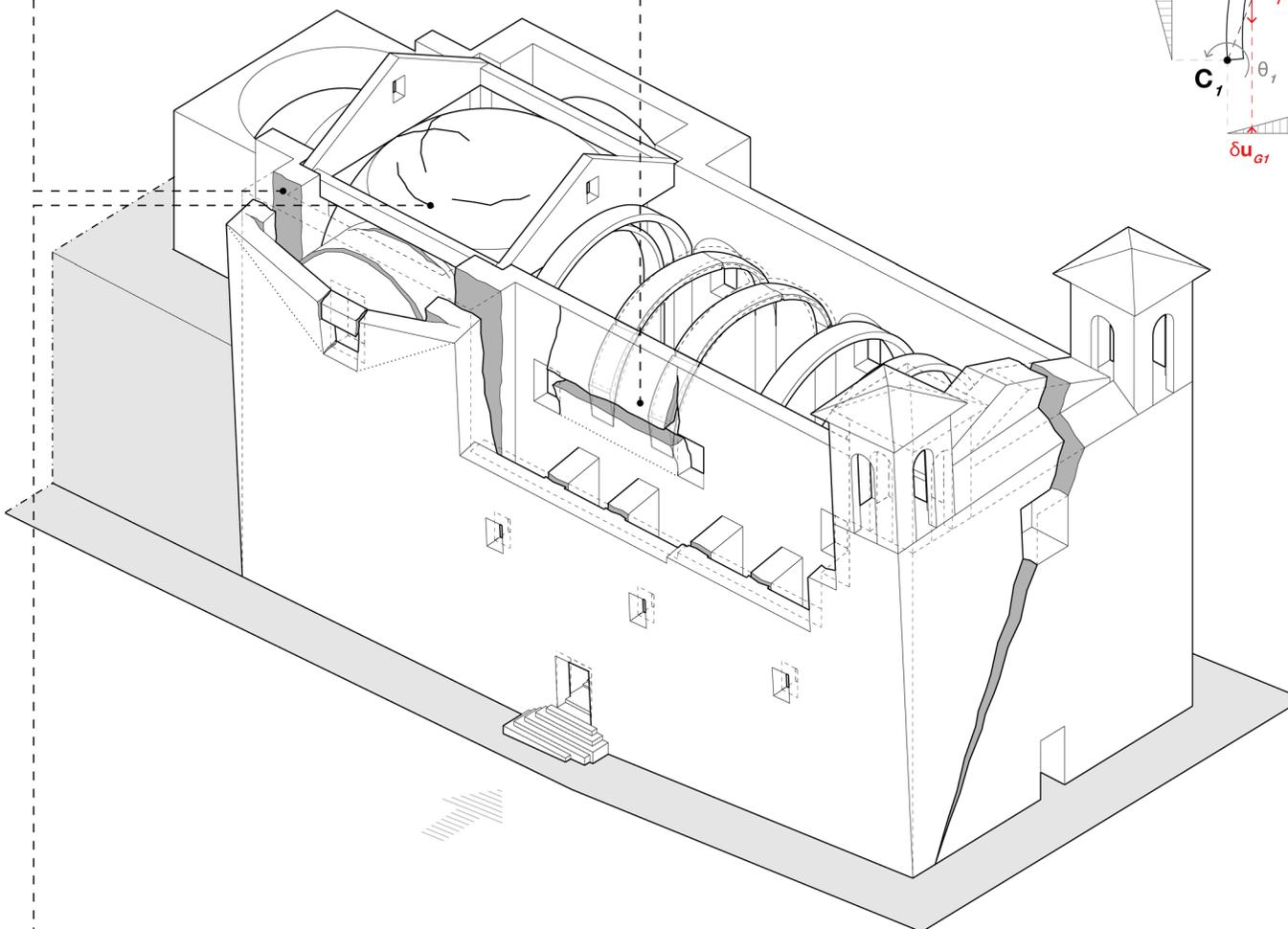
5 m

5. Chiesa di San Marco interpretazione del danno e cinematismi ●●●

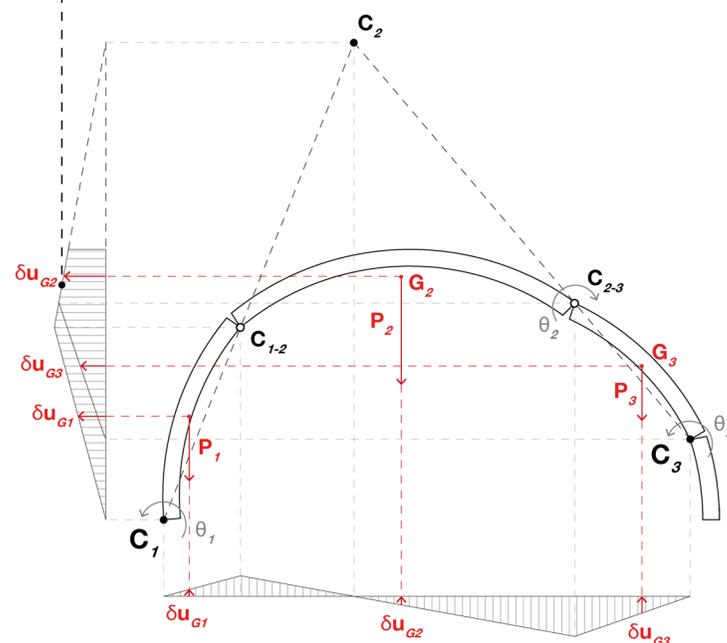


1 La **risposta trasversale dell'aula** è il meccanismo più severo; a questo è dovuto il crollo della parte superiore della parete del fianco sinistro. La localizzazione del crollo è dovuto sia al maggior impulso del sisma in direzione nord-sud che alla **maggiore snellezza della parete longitudinale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

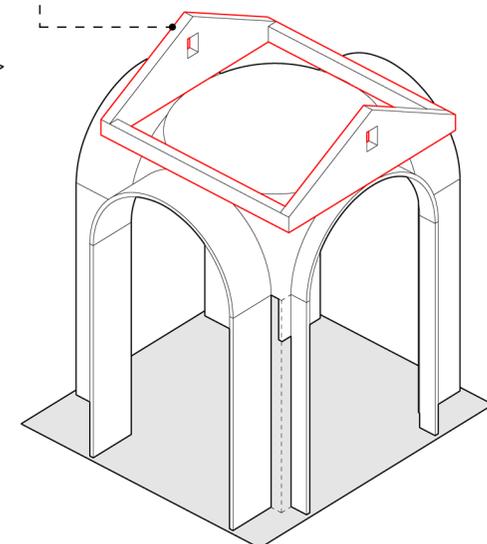
3 Il movimento trasversale della chiesa ha, inoltre, provocato danni diffusi nella zona presbiteriale, quali il **ribaltamento delle pareti del transetto** e il **distacco** delle stesse rispetto alle volte a botte laterali.



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.



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.

Convenzioni grafiche

Rilievo del danno

- fessurazione
- ▨ distacco superficiale
- crollo

Interpretazione del danno e cinematismi

- posizione indeformata
- asse di rotazione
- - - linea di sezione
- superfici lesionate
- ▨ superfici sezionate
- contesto
- ☞ direzione del moto del suolo

Grado di affidabilità dei meccanismi

- scarsa presenza di fonti
- discreta presenza di fonti
- consistente presenza di fonti

Chiesa di Sant'Agostino

Fonti

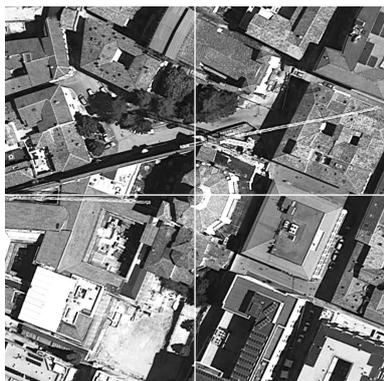
1 C. Calderini, S. Lagomarsino, *Chiesa di Sant'Agostino. Note storiche e costruttive. Lettura del danno e della vulnerabilità. Considerazioni sul restauro e la ricostruzione*, Università degli Studi di Genova Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni dell'Ambiente e del Territorio, 2009.

2 C. Calderini, S. Lagomarsino, *The behaviour of S. Agostino church during 6th April 2009 Earthquake in L'Aquila. Vulnerability and damage assessment*, «Advanced Materials Research», 133-134, 2010, pp. 771-776.

3 C. Cennamo, C. Cusano, *Consolidation with reinforced concrete for the ecclesiastical architecture in L'Aquila (Italy): observations after the earthquake*, Heritage and Technology Mind Knowledge Experience, XIII International Forum, Le Vie dei Mercanti, 2015.

4 Le Chiese delle Diocesi Italiane, Chiesa di Sant'Agostino. <https://chieseitaliane.chiesacattolica.it/chieseitaliane/schedacc.jsp?navG=true&pref=cs&sinetica=true&sineticabool=true&sercd=1453>, u.c. gennaio 2024.

6. Chiesa di Sant'Agostino scheda sintetica



Localizzazione

42°20'50.3"N 13°23'50.9"E
Via Sant'Agostino 1
67100, L'Aquila (AQ)

Prima fondazione | La chiesa sorge su un edificio religioso ad impianto basilicale risalente al XIII secolo; distrutto dal terremoto del 1703, il progetto della nuova chiesa fu redatto dall'architetto Giovanbattista Contini, della scuola del Bernini, nel 1708. La chiesa aveva dimensioni maggiori rispetto a quella originaria (come testimoniato dall'acquisto di una serie di particelle da parte dell'Ordine) rispetto alla quale è indipendente dal punto di vista strutturale. Dopo la sospensione dei lavori per problemi di natura giuridica, la costruzione venne ultimata nel 1725.

Trasformazioni | Le uniche notizie pervenute riguardano la copertura del lanternino sovrastante la cupola: sostituita durante gli anni '80 del novecento con una struttura metallica leggera, è ancorata alle colonne in pietra originarie mediante un anello in c.a.. Durante l'evento sismico del 6 aprile del 2009, si trovava in fase di restauro.

Note tipologiche e costruttive | Il corpo principale della chiesa è costituito principalmente da tre elementi architettonici: l'atrio, l'aula ellittica con tre coppie di cappelle e il presbiterio, concluso da un'abside semicircolare. Sul lato nord-ovest della chiesa sono presenti un campanile, con pianta a L, e la sagrestia. Una serie di corpi bassi circondano la costruzione nella zona contigua al presbiterio e all'abside. Le cappelle più piccole a lato dell'aula sono coperte con volte a vela, quelle più grandi presentano, invece, volte a botte. La facciata si articola su due ordini e il superiore, ricavato su una delle facce del tiburio, è arretrato rispetto a quello inferiore.

L'aula è sormontata da una cupola anch'essa ellittica, impostata su un tozzo tamburo. La cupola è sormontata da una lanterna e presenta esteriormente un tiburio con otto contrafforti, posti in corrispondenza delle lesene interne. È possibile che vi sia un rinfianco fino al livello superiore dei contrafforti.

La copertura è realizzata in legno. In corrispondenza delle otto lesene interne della cupola e dei contrafforti, svettano otto pareti verticali sulle quali appoggia la struttura lignea principale. Tali pareti svolgono anche l'importante funzione di collegare la cupola al tiburio, agendo come frenelli.

Anche a lato del presbiterio e dell'abside sono presenti due robusti contrafforti.

È possibile osservare che tutte le superfici voltate, gli archi e gli architravi, visibili a causa di distacchi di intonaco, sono in muratura di laterizio di ottima qualità. Tutte le strutture verticali appaiono, invece, realizzate in muratura mista pietra e laterizio di media qualità, con cantonali ben connessi in pietra squadrata. I contrafforti appaiono dall'esterno in muratura di pietra squadrata di ottima qualità. In alcuni casi, al di sopra degli architravi delle aperture esterne, si riconoscono elementi lignei di rinforzo. All'interno della costruzione non sono visibili catene metalliche; tuttavia, i bolzoni esterni denunciano la loro presenza solo dal lato di via Sant'Agostino, unico fianco libero della chiesa.

Interpretazione del danno | L'edificio è stato fortemente danneggiato dal terremoto del 2009 e il quadro fessurativo rilevato consente di analizzare i principali meccanismi attivati.

I danni rilevati si devono a movimenti che hanno interessato la chiesa lungo il suo asse maggiore. A questo, infatti, sono riconducibili diversi meccanismi, quali il ribaltamento della facciata, che giustifica

le lesioni di taglio delle pareti laterali, e la risposta longitudinale dell'aula, a cui sono ascrivibili le lesioni negli arconi di accesso alle cappelle maggiori laterali, che si estendono dalle reni degli archi alla cornice di imposta del tamburo; queste si ripropongono analoghe sopra gli architravi delle aperture superiori alle cappelle minori. Come la struttura dell'aula, anche la cupola sovrastante e le volte delle cappelle maggiori laterali hanno riportato importanti lesioni di taglio.

In particolare, sulla struttura della cupola si rilevano lesioni meridiane e diagonali su tutti gli spicchi, più accentuate in corrispondenza dell'atrio, dove l'efficacia dei contrafforti esterni è minore rispetto a quella dei contrafforti posti in direzione trasversale. La cupola presenta anche un'importante lesione passante lungo il parallelo mediano in corrispondenza dell'abside (che denuncia un tipico meccanismo a "scoperchiamento"¹, ovvero un ribaltamento rigido dell'intera cupola).

Anche il corpo relativo all'abside e al presbiterio presenta lesioni riconducibili a un movimento in direzione longitudinale, sia nelle strutture portanti verticali che nelle strutture voltate. Si evidenziano in particolare le lesioni che denunciano il distacco del presbiterio rispetto al corpo dell'aula e il ribaltamento dell'abside.

Altri danni di minore entità, ascrivibili all'impulso in direzione trasversale del sisma, consistono in alcune lievi lesioni di taglio nella facciata e quelle che, analogamente a quanto prima descritto, interessano gli archi di separazione tra atrio-aula e aula-abside.

In conclusione, il prevalere della risposta globale della chiesa in direzione longitudinale è giustificabile, oltre che dalla direzione del moto sismico, per la maggiore spinta della cupola lungo il suo asse maggiore e la presenza di contrafforti più efficaci in direzione trasversale. Il movimento della cupola ha portato, inoltre, al collasso della lanterna sovrastante, il cui movimento è stato probabilmente influenzato anche dall'intervento di sostituzione della copertura precedentemente descritto e dalla connessione alle colonne lapidee preesistenti realizzata in c.a., per la differente risposta in condizioni dinamiche rispetto alla muratura.

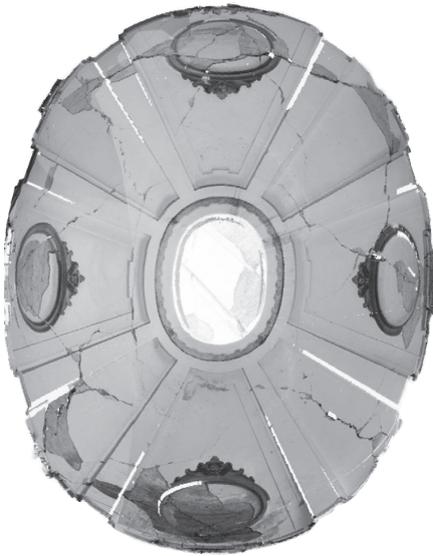
1 C. Calderini, S. Lagomarsino, *Chiesa di Sant'Agostino... op. cit.*



Fonti

Prospetto principale
esposto a nord est.

1, 4



Vista e nuvola di punti
della cupola ellittica. **1**

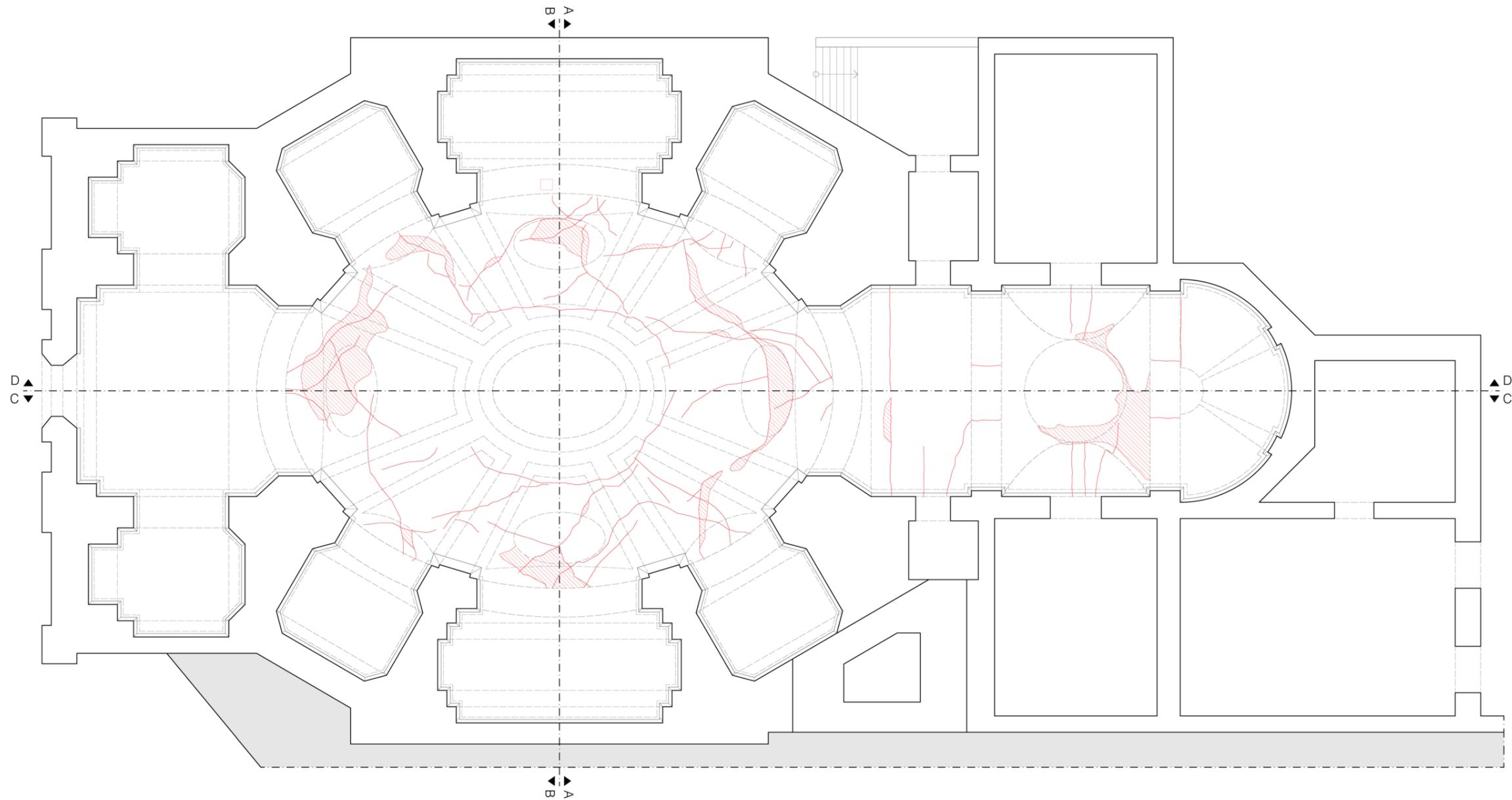


Volta a botte lunettata
presbiteriale. **1**

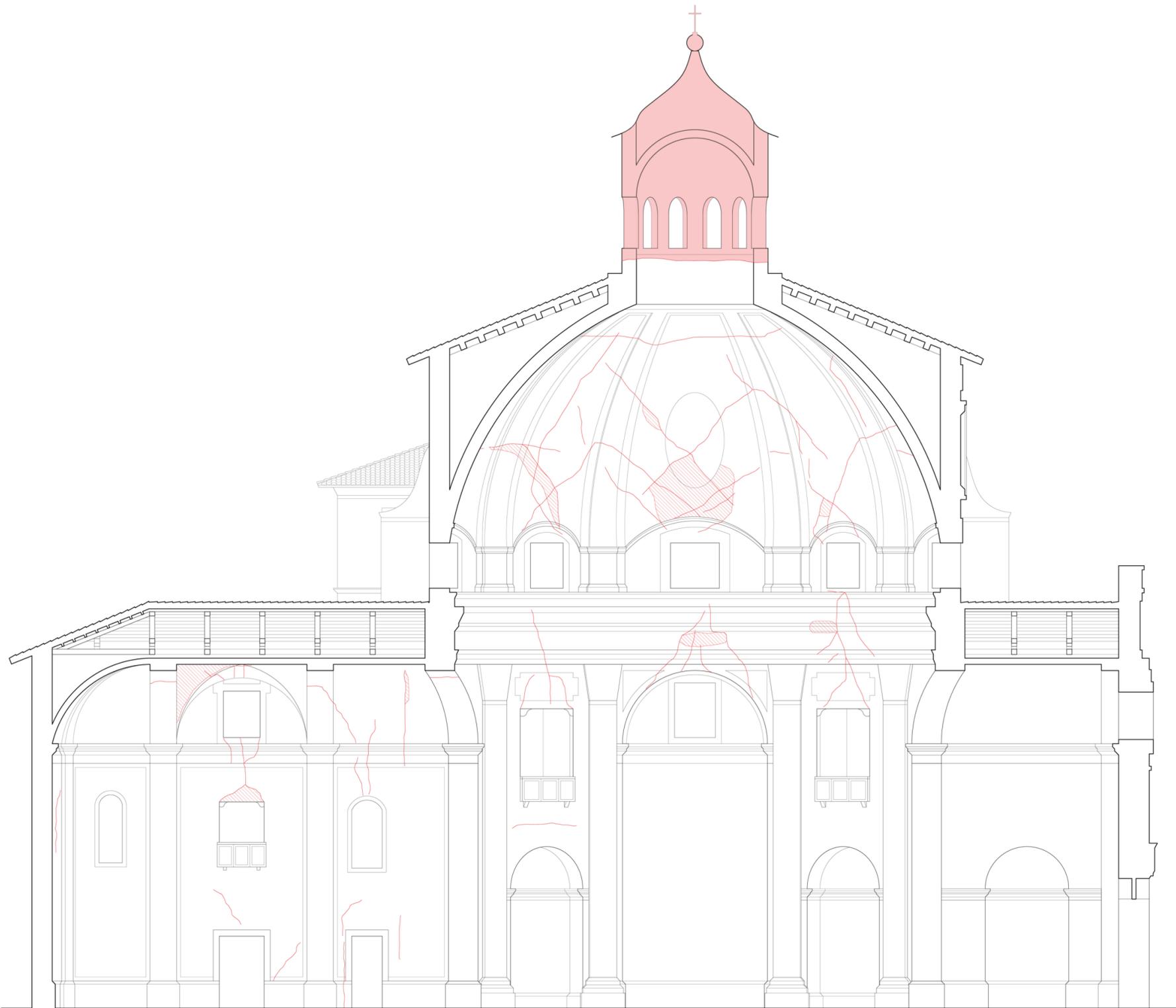


Lanterna e campanile
della chiesa. **1**

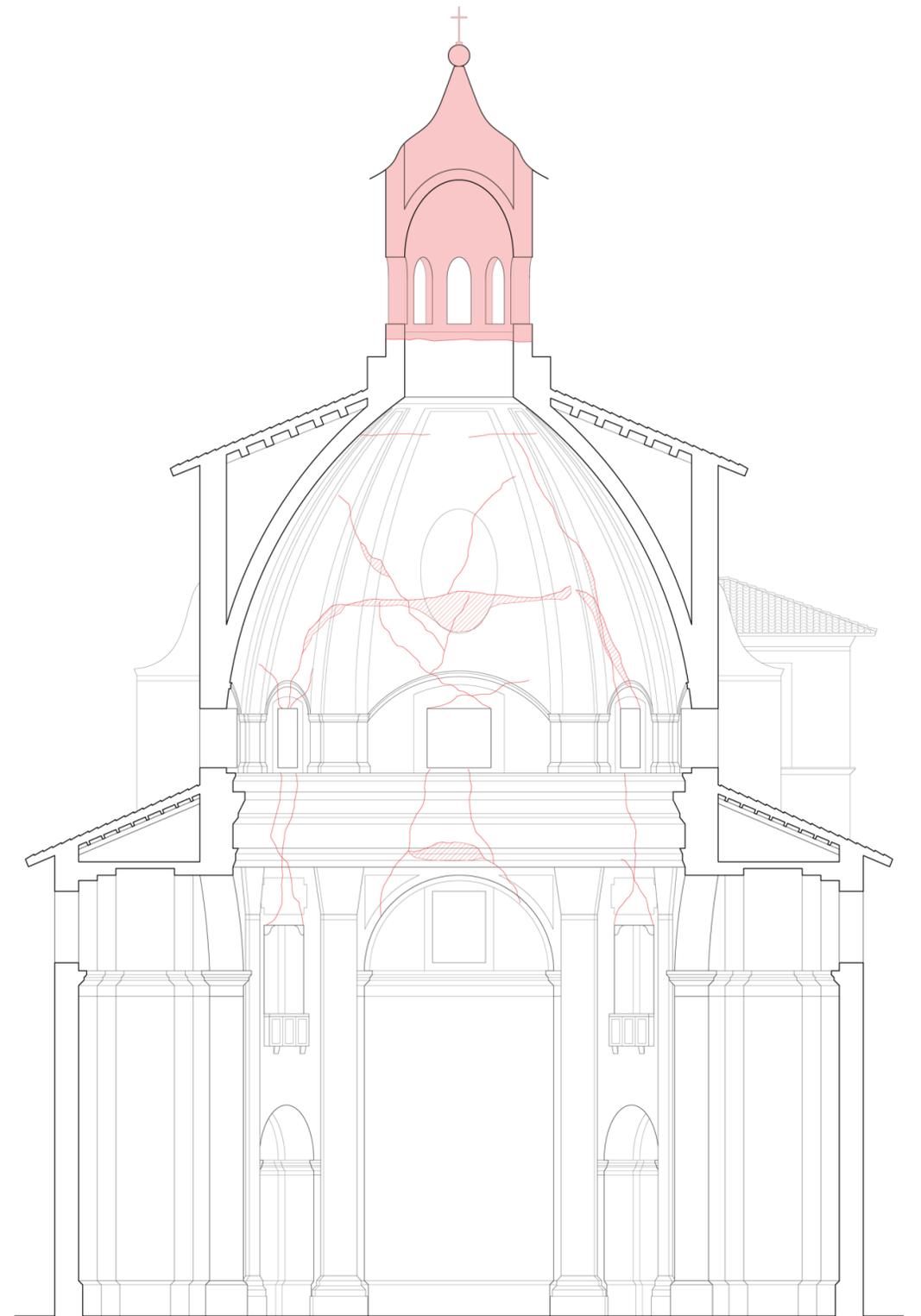
6. Chiesa di Sant'Agostino rilievo del danno, 1:200



Planimetria



Sezione CC

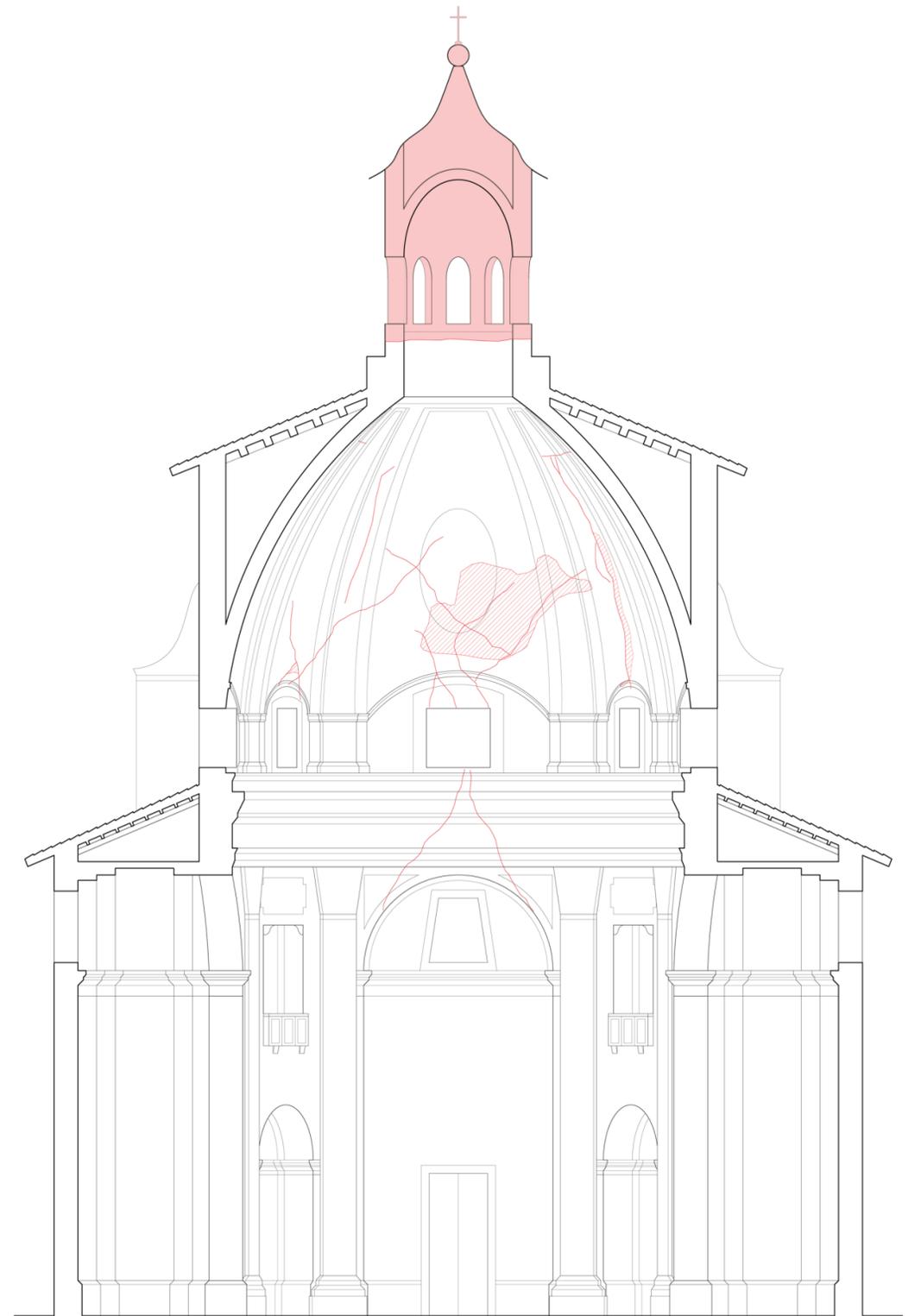


Sezione AA

5 m



Sezione DD



Sezione BB

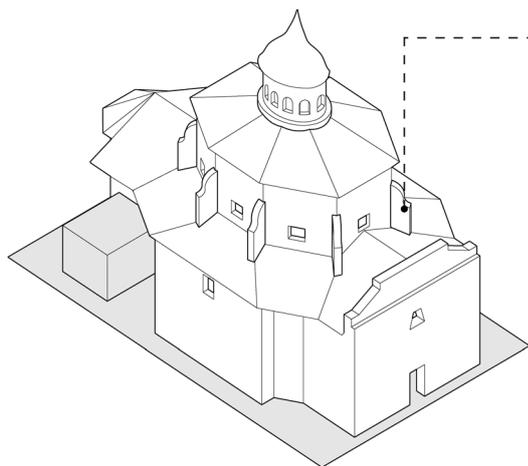
5 m



Prospetto nord est

5 m

6. Chiesa di Sant'Agostino interpretazione del danno e cinematismi ●●●

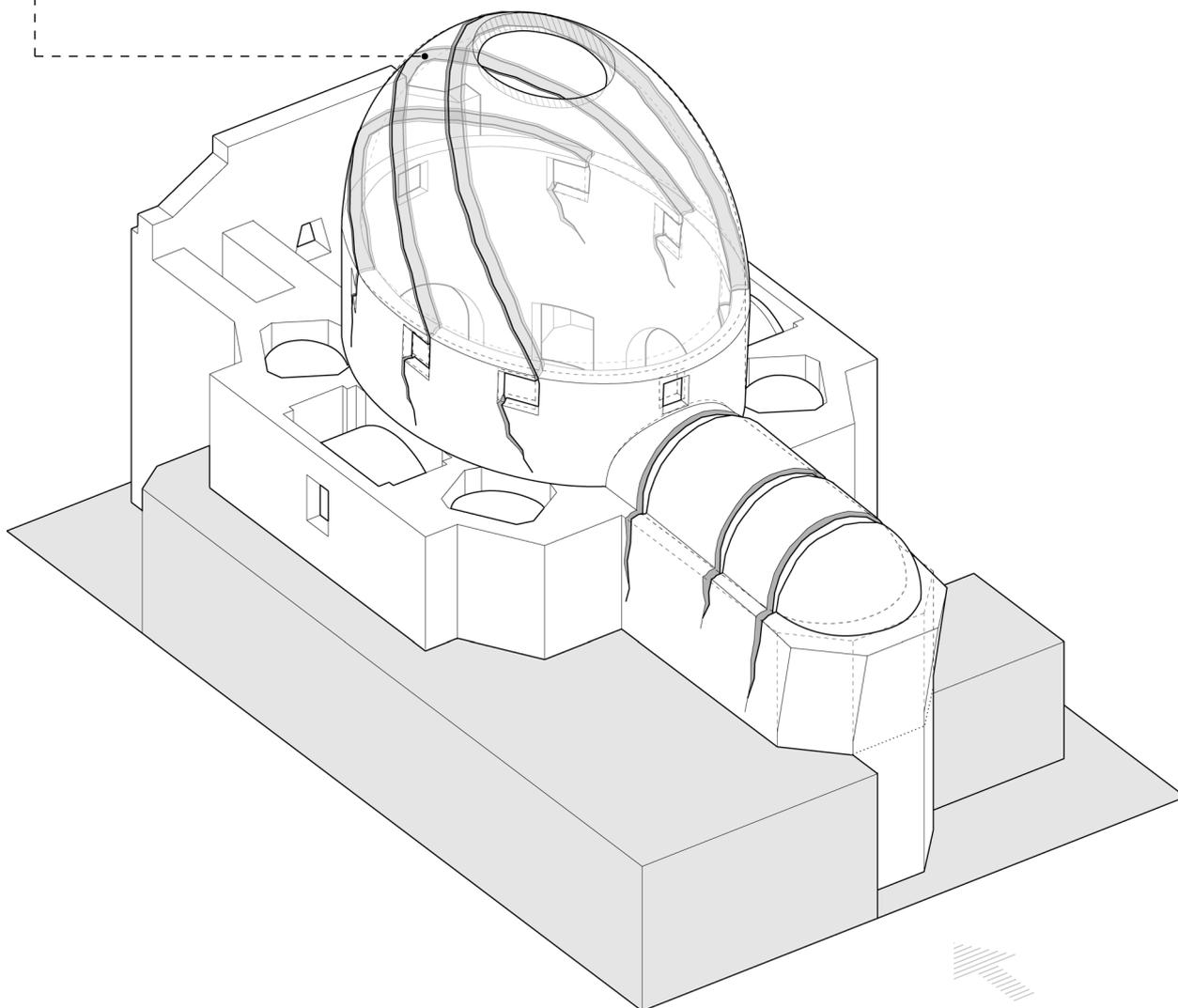


1

I principali danni rilevati sono causati da movimenti lungo l'**asse longitudinale** della chiesa; è possibile osservare che i contrafforti, perpendicolari a detto asse, e gli edifici realizzati in adiacenza ai fronti laterali abbiano aumentato l'efficacia della resistenza a movimenti trasversali della fabbrica. Al movimento longitudinale sono riconducibili diversi meccanismi, quali il **ribaltamento dell'abside e della zona presbiteriale** e la **risposta longitudinale dell'aula**, meccanismo più severo.

2

Tale movimento ha prodotto un quadro fessurativo diffuso nella struttura ellittica della cupola, che riporta principalmente **lesioni ad andamento inclinato**, con diverse angolature, che suggeriscono la presenza di **flussi preferenziali di scarico delle forze**, disposti lungo archi *virtuali* interni alla stessa struttura. Tali lesioni sono probabilmente dovute al ribaltamento simmetrico della cupola, un **meccanismo di scoperchiamento**.



Convenzioni grafiche

Rilievo del danno

-  fessurazione
-  distacco superficiale
-  crollo

Interpretazione del danno e cinematismi

-  --- posizione indeformata
-  asse di rotazione
-  -.- linea di sezione
-  ■ superfici lesionate
-  ▨ superfici sezionate
-  □ contesto
-  ▨ direzione del moto del suolo

Grado di affidabilità dei meccanismi

-  ● scarsa presenza di fonti
-  ●● discreta presenza di fonti
-  ●●● consistente presenza di fonti

Chiesa di Santa Maria degli Angeli

Fonti

1 E. Giuriani, *Relazione Santa Maria degli Angeli fuori Porta Napoli*, Università degli Studi di Brescia, Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio e Ambiente, 2009.

2 Le Chiese delle Diocesi Italiane, Chiesa di Santa Maria degli Angeli. <https://chieseitaliane.chiesacattolica.it/chieseitaliane/schedacc.jsp?navG=true&pref=cs&sintetica=true&sinteticabool=true&sercd=1218>, u.c. gennaio 2024.

8. Chiesa di Santa Maria degli Angeli scheda sintetica



Localizzazione

42°20'37.99"N 13°23'37.82"E
Via Santa Maria degli Angeli
67100, L'Aquila (AQ)

Prima fondazione | La chiesa fu probabilmente fondata agli inizi del XVI secolo su un'antica edicola al cui interno è documentata la presenza di un affresco quattrocentesco della Madonna degli Angeli. L'affresco si conserva sulla parete nord est dell'abside, che presenta una leggera inclinazione rispetto al resto della chiesa.

Trasformazioni | La costruzione dell'originaria facciata ad intonaco (la cui composizione architettonica era caratterizzata dal portale con timpano spezzato e due quadrotte laterali, sormontato da una finestra rettangolare) risale al XVII secolo. L'attuale facciata proviene dalla chiesa di Santa Maria del Guasto, demolita nel 1932.

Al XVIII secolo risale la realizzazione dell'apparato decorativo barocco in stucco caratterizzante i prospetti interni. Agli stessi stuccatori che operavano nella chiesa si attribuiscono le decorazioni realizzate dopo il terremoto del 1703 nella calotta della cupola di Collemaggio.

Le nicchie presenti nei prospetti interni est ed ovest presentano segni di tamponature successive.

La chiesa a seguito del sisma è stata dichiarata inagibile.

Note tipologiche e costruttive | L'edificio, isolato, presenta un impianto di modeste dimensioni ad aula unica rettangolare, conclusa a nord da tre ambienti: l'abside al centro, cui si accede dall'arco trionfale, presenta anch'esso a pianta rettangolare, è coperto da una volta a vela impostata su pennacchi e ospita l'altare maggiore, sormontato dall'affresco sopra citato; i rimanenti due locali laterali fungono da sacrestia e canonica. Attraverso il vano a nord ovest, si accede ad un piccolo locale, che conduce a un ambiente interrato. La stessa tripartizione (arco trionfale centrale e due aperture laterali) si ripresenta nelle pareti laterali dell'aula, scandite anch'esse da lesene corinzie: al centro sono presenti due altari minori con soprastante apparato decorativo e dipinto; lateralmente le aperture di piccole nicchie ormai tamponate presentano altezza variabile.

La struttura lignea della copertura non è stata ispezionata in quanto inaccessibile per la presenza di un controsoffitto intonacato che copre l'intera aula.

La facciata è realizzata secondo la tradizione costruttiva e tipologica aquilana: di forma quadrangolare, a due ordini separati da cornice marcapiano; la parte sovrastante è caratterizzata da un rosone centrale e quella sottostante da un portale con incorniciatura modanata. La facciata è realizzata con un paramento a blocchi squadri.

Le murature del complesso religioso sono realizzate in mattoni e malta di calce con tessiture variabili.

Interpretazione del danno | La chiesa e l'annesso corpo di fabbrica della canonica presentano un quadro fessurativo evidente ma di modesta estensione.

Uno dei principali meccanismi attivati, dovuti all'impulso in direzione longitudinale, è quello di ribaltamento della facciata, indotto anche dal martellamento della struttura di copertura, testimoniato dalla lesione orizzontale in facciata e da quelle presenti nei prospetti laterali in prossimità della stessa. Il meccanismo descritto ha causato anche la fuoriuscita di sede dei conci. I danni provocati dall'impulso longitudinale

possono essere letti anche nelle lesioni verticali nei prospetti laterali all'intersezione con le pareti ortogonali, dovuti probabilmente al mancato ammorsamento.

Relativamente all'impulso in direzione trasversale alla chiesa, è possibile osservare come molte lesioni, visibili in facciata, nel muro absidale sia internamente che esternamente e nella volta a vela, presentino la medesima inclinazione. In particolare, le lesioni riscontrate nella struttura voltata sono dovute all'oscillazione nel piano della parete di fondo dell'aula. Questa, infatti, presenta una maggiore snellezza rispetto alla parete absidale, di altezza inferiore. Inoltre, l'impianto dell'abside, più compatto, rende la parete di fondo meno vulnerabile rispetto a movimenti nel piano, al contrario della prima, le cui oscillazioni sono più pronunciate. Il movimento relativo tra le due pareti determina uno scorrimento della volta, con la comparsa di lesioni ortogonali alle diagonali che, alternativamente, esibiscono movimenti estensivi. Anche le lesioni di taglio interne all'aula, rilevabili in prossimità delle catene delle capriate, testimoniano l'interessamento delle murature da una forza nel piano.

Il quadro fessurativo sopra descritto induce a ipotizzare che probabilmente l'impulso maggiore sia stato in direzione est-ovest, trasversalmente rispetto all'asse dell'edificio.



Prospetto principale esposto a sud ovest. 1



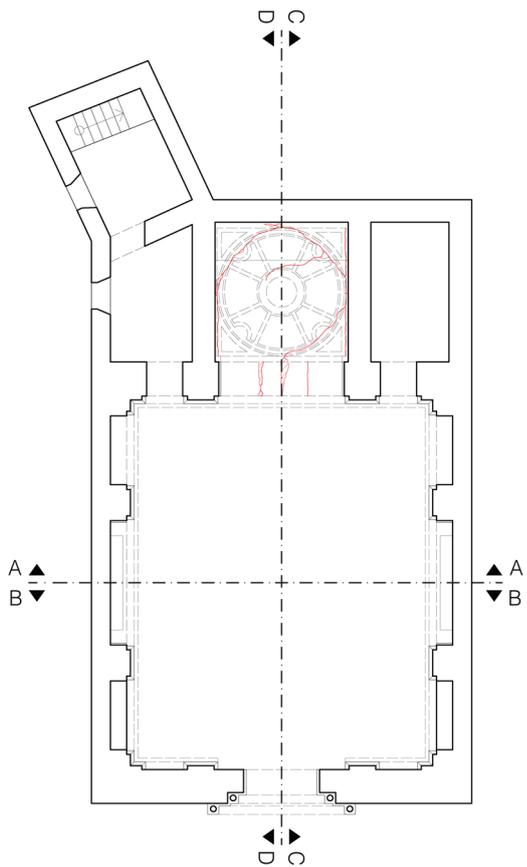
Prospetti interni. 1



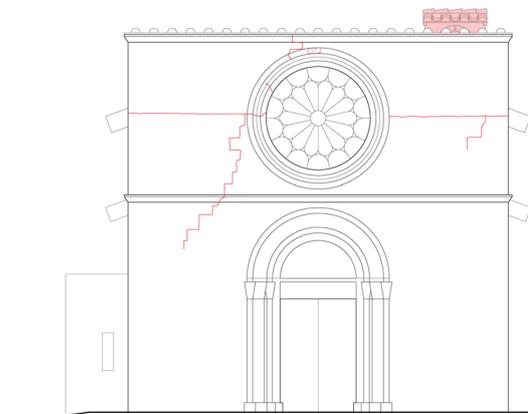
Vista interna dell'abside con la volta a vela ribassata e l'arco trionfale di accesso al vano. 1



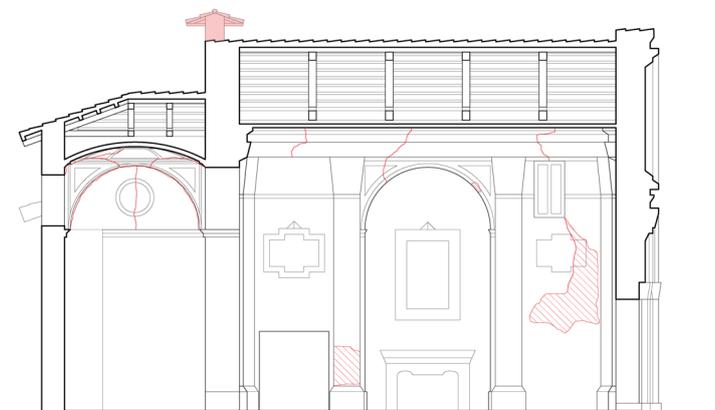
8. Chiesa di Santa Maria degli Angeli rilievo del danno, 1:200



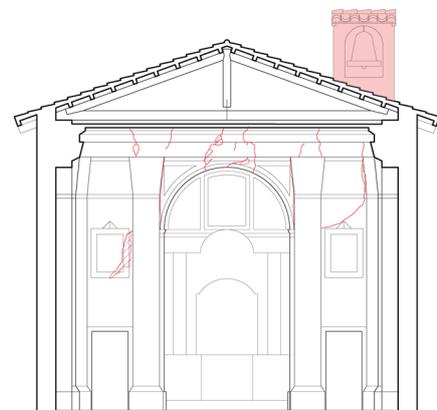
Planimetria



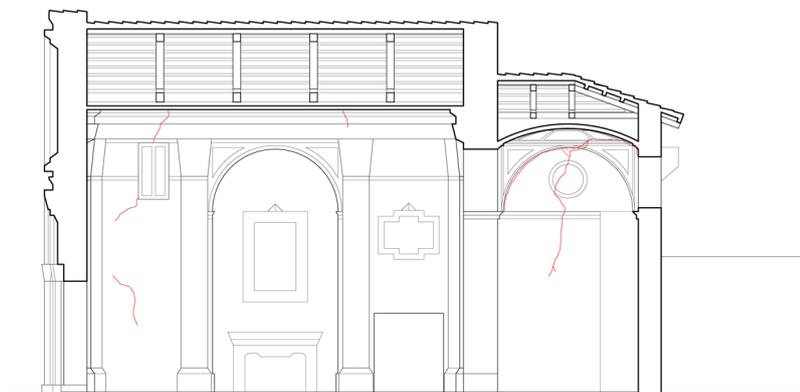
Prospetto sud ovest



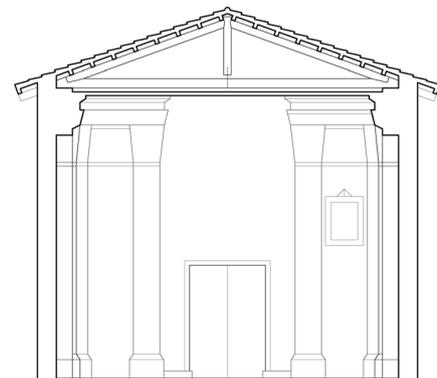
Sezione CC



Sezione AA



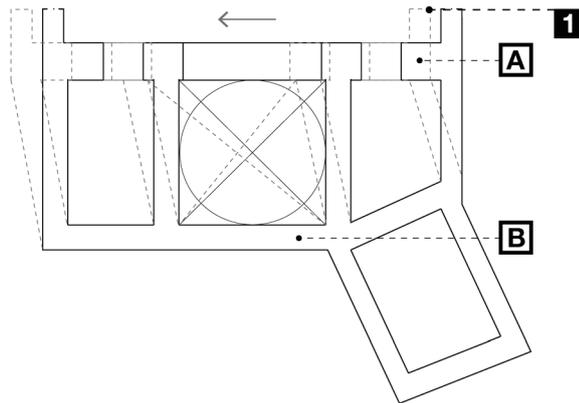
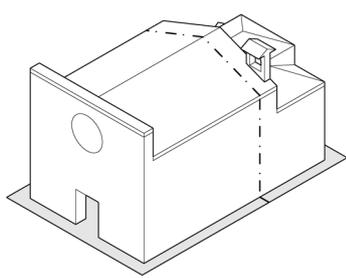
Sezione DD



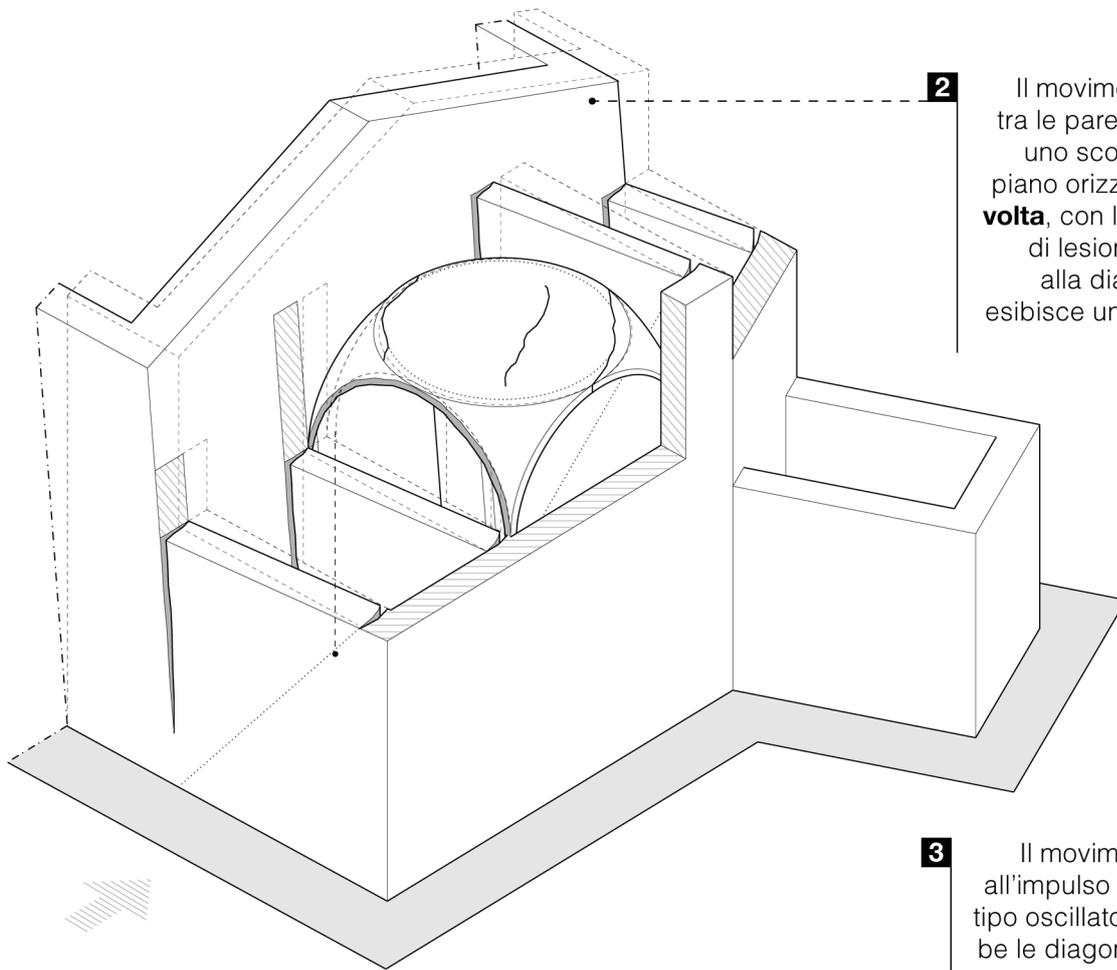
Sezione BB



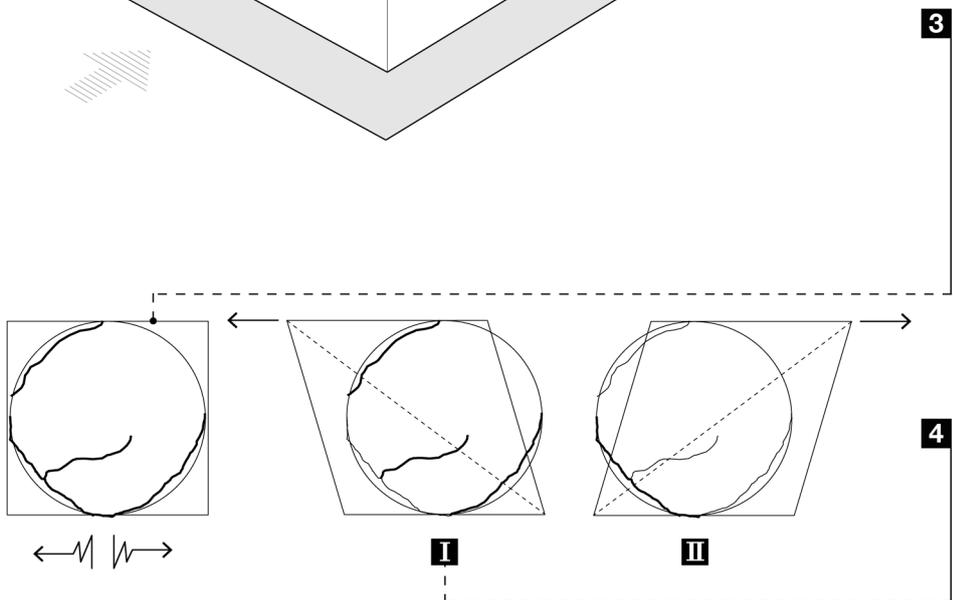
8. Chiesa di Santa Maria degli Angeli interpretazione del danno e cinematismi •



1 Le oscillazioni nel piano della **parete dell'aula A** sono più pronunciate rispetto a quelle della **parete absidale B** a causa della maggiore snellezza della parete A e della maggiore compattezza della struttura absidale.



2 Il movimento relativo tra le pareti determina uno scorrimento nel piano orizzontale della **volta**, 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**.

4 Analizzando le lesioni nei due differenti casi, è possibile ipotizzare che l'impulso che determina il **movimento I** presenti una maggiore intensità.

Convenzioni grafiche

Rilievo del danno

- fessurazione
- ▨ distacco superficiale
- crollo

Interpretazione del danno e cinematismi

- posizione indeformata
- asse di rotazione
- - - linea di sezione
- superfici lesionate
- ▨ superfici sezionate
- contesto
- ☞ direzione del moto del suolo

Grado di affidabilità dei meccanismi

- scarsa presenza di fonti
- discreta presenza di fonti
- consistente presenza di fonti

Chiesa di Santa Maria ad Cryptas

Fonti

1 F. De Cesaris, D. Fiorani, G. de Felice, A. Donatelli, A. Placidi, A. Mauro, *Chiesa di S. Maria ad Cryptas a Fossa (L'Aquila)*, Università degli Studi La Sapienza, Scuola di Specializzazione in Beni Architettonici e del Paesaggio, Università degli Studi Roma Tre, Dipartimento di Strutture, 2009.

2 Le Chiese delle Diocesi Italiane, Chiesa di Santa Maria ad Cryptas. <https://chieseitaliane.chiesacattolica.it/chieseitaliane/schedacc.jsp?sinteticabool=true&sintetica=true&sercd=1461#>, u.c. gennaio 2024.

9. Chiesa di Santa Maria ad Cryptas scheda sintetica



Localizzazione

42°18'06.5"N 13°29'02.3"E

Via Aie della Madonna

67020, Fossa (AQ)

Prima fondazione | Nonostante le vicende storiche della chiesa non siano chiare, è possibile ipotizzare che il nucleo originale della chiesa sia stato edificato prima del IV secolo e ricostruito nella forma attuale, ma presumibilmente privo di abside, tra il X e il XIII secolo come chiesa cistercense, epoca in cui vennero realizzati i cicli pittorici interni.

Trasformazioni | L'eterogeneità delle tecniche e dei materiali rilevabili nella compagine strutturale della fabbrica testimonia il susseguirsi di diverse fasi costruttive, che tuttavia non risultano documentate. Relativamente alla cronologia degli interventi della copertura sono state avanzate tre diverse ipotesi. Una prima presuppone l'iniziale costruzione della volta a botte, il successivo crollo e, in conseguenza di ciò, la costruzione dei contrafforti a nord-est e l'abside sopra la cripta preesistente. Altra ipotesi è invece quella secondo la quale il progetto sia stato modificato in corso d'opera, prevedendo la realizzazione delle capriate lignee già durante il primo cantiere. L'ultima ipotesi si fonda sull'idea che la costruzione delle capriate sopra l'imposta della botte sia dovuta a una precisa scelta progettuale, forse da ricondurre alla presenza di una copertura carenata in legno nella vicina chiesa, anch'essa cistercense, di Santo Spirito d'Ocre.

Nel XV secolo la chiesa viene arricchita dall'edicola pensile in pietra e, nel 1500, dall'altare localizzato nel fianco destro.

La copertura lignea è stata ricostruita negli anni '60 del secolo scorso.

Dopo il sisma del 2009, la chiesa, fortemente danneggiata, fu oggetto di interventi strutturali ed architettonici e riaperta al culto solo nel 2019.

Note tipologiche e costruttive | L'edificio è situato a ridosso di un pendio, in posizione isolata; è ad aula unica con tetto a doppia falda e copertura lignea a vista; l'abside, a pianta quadrangolare con volta a crociera rialzata e costolonata, presenta un andamento deviato rispetto all'aula. Davanti al vano presbiteriale è situata una ripida scala che consente l'accesso alla sottostante cripta, voltata a crociera. La facciata principale, a capanna, è caratterizzata da un portale ad arco ogivale sormontato da una apertura rettangolare fortemente strombata; alle estremità del prospetto nord-est sono situati due contrafforti in corrispondenza delle due pareti trasversali. Sulla sommità della parete di fondo dell'aula, cui è addossata l'abside con tetto a doppia falda, si erge un campanile a vela ad un fornice. L'interno dell'aula è riccamente affrescato con cicli pittorici del XII e XIII secolo; in particolare quello della parete settentrionale, dedicato alla vita della Madonna, è opera di artisti di scuola toscana che intervennero dopo il crollo causato dal sisma del 1313.

La fabbrica è realizzata con bozze e blocchi di calcare e malta di calce e sabbia. Le murature presentano alcune diversità costruttive: sono distinguibili due diverse tipologie murarie: la prima, in filari di blocchetti calcarei, rilevabile nella parete longitudinale a nord-est, nella parte basamentale della opposta parete a sud-ovest, in facciata e nell'abside; la seconda, costituita da un apparecchio in bozze più irregolare, visibile nel tratto superiore della parete sud-ovest, nei fianchi dell'abside e nelle facce interne dei contrafforti. Le murature si presentano ben connesse. Aula e abside, differenti per dimensioni, spessori murari e tipologia

di copertura, si comportano dinamicamente come due celle distinte.

Interpretazione del danno | Il quadro fessurativo risulta chiaro e ben definito. Importante sottolineare che alcuni documenti fotografici novecenteschi consentono di rilevare un quadro fessurativo già presente prima del sisma.

I danni dovuti alla componente longitudinale dell'azione sismica sono di maggiore entità e si presentano in maggior numero. In particolare, molte delle lesioni prima descritte sono riconducibili a una rotazione fuori piano delle due pareti trasversali dell'edificio (facciata principale e parete absidale), chiaramente leggibile per la presenza delle lesioni nelle pareti longitudinali ad andamento subverticale in prossimità dei cantonali e per il crollo verificatosi nella parete posteriore. Le lesioni leggibili nella parete divisoria tra l'aula e l'abside sono dovute principalmente al martellamento dell'abside (la lesione ad andamento verticale) e a quello della copertura (quella inclinata), entrambi cinematismi comunque dovuti a un movimento in direzione longitudinale.

Relativamente alla volta a crociera della zona absidale, come sopra accennato, il ribaltamento asimmetrico della parete absidale ha indotto una riduzione del contrasto delle sezioni di imposta delle costolature, che hanno reagito in maniera differente. Il cinematismo ha, infatti, provocato una maggiore dislocazione dell'imposta di uno dei due archi, che presenta per questo fenomeni diffusi di scorrimento dei conci. Il secondo arco assorbe maggiori sforzi di compressione ed è quindi interessato da un meccanismo flessionale che implica la formazione di cerniere. Il cinematismo comporta inoltre il distacco della volta dalle pareti perimetrali dell'abside, testimoniato dalle lesioni perimetrali visibili all'imposta della volta.

Altri dissesti localizzati derivano da sollecitazioni fuori piano delle pareti longitudinali, quindi ad un impulso nella direzione trasversale, con effetti puntuali di espulsione delle angolate e lesioni orizzontali rilevabili nelle pareti longitudinali. Il quadro fessurativo relativo all'edicola interna alla chiesa è riconducibile a un movimento della colonna ad ovest verso l'esterno.

In conclusione, il sisma sembra essere orientato in direzione assai prossima all'asse longitudinale della chiesa.



Fonti

Prospetto principale
esposto a nord ovest.

1



Prospetto esposto a
sud est. **1**



Prospetti interni. **1**

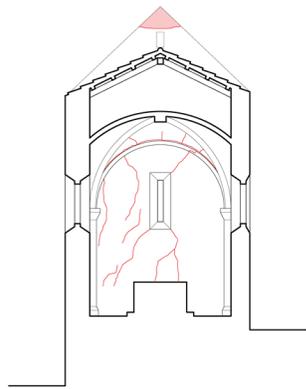


Volta a crociera
absidale. **1**

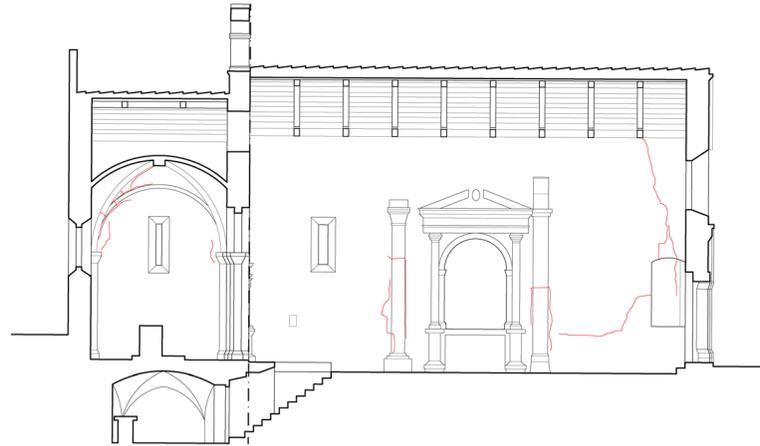


Edicola pensile con
volta a vela. **1**

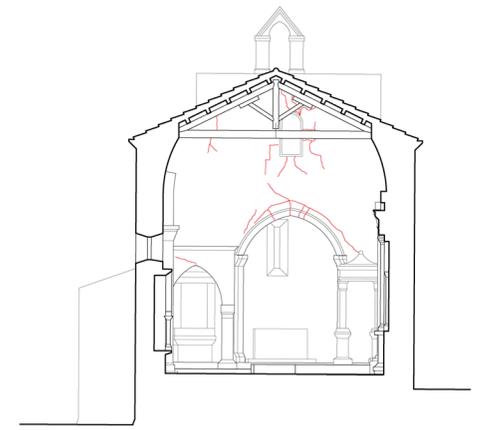
5. Chiesa di Santa Maria ad Cryptas rilievo del danno, 1:200



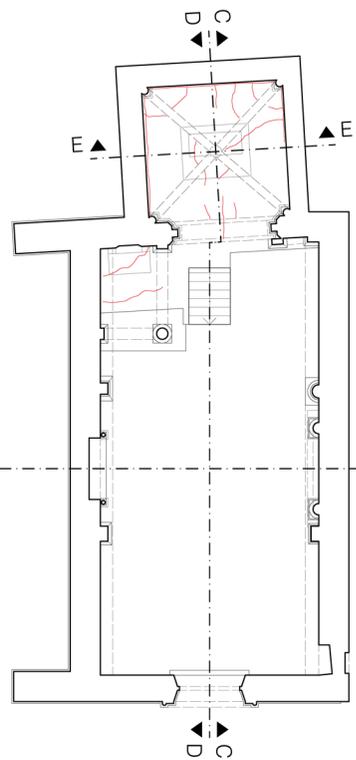
Sezione EE



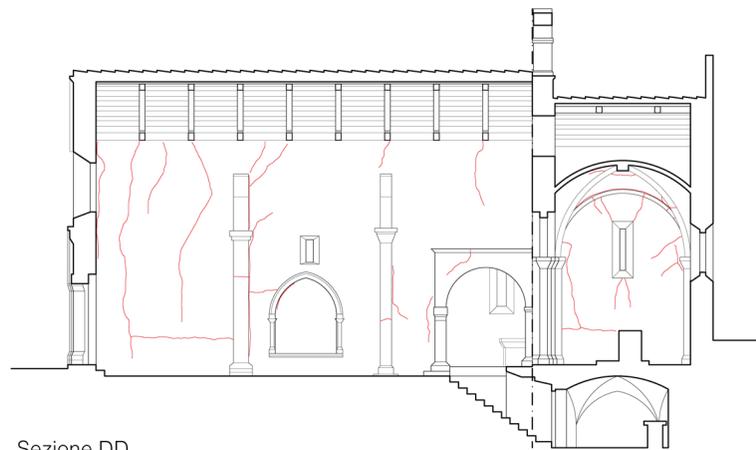
Sezione CC



Sezione AA



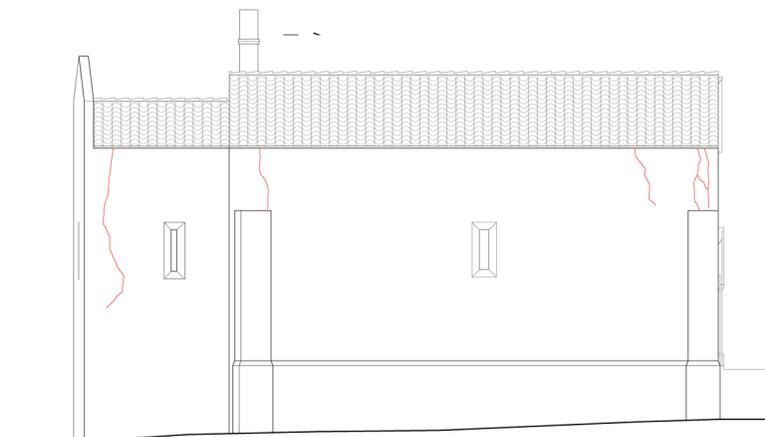
Planimetria



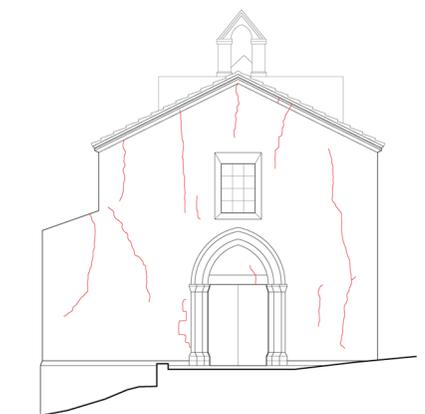
Sezione DD



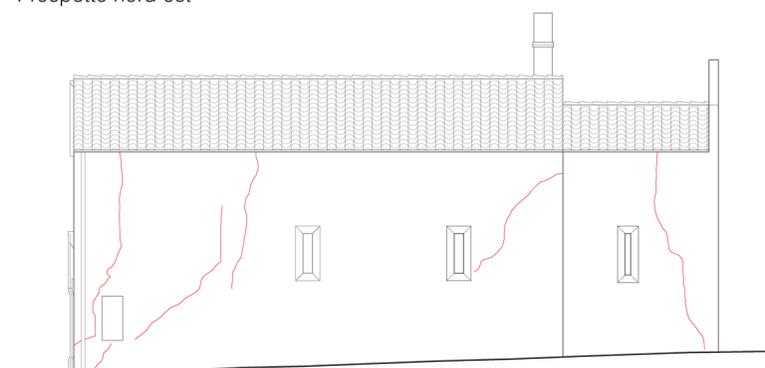
Sezione BB



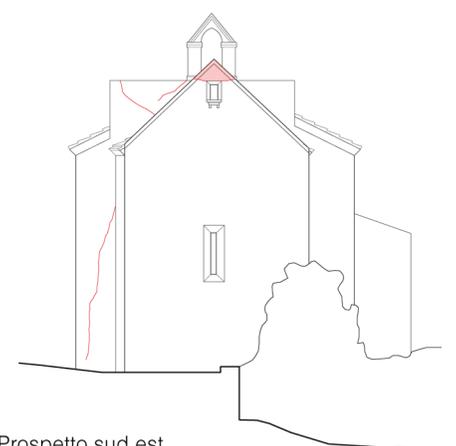
Prospetto nord est



Prospetto nord ovest



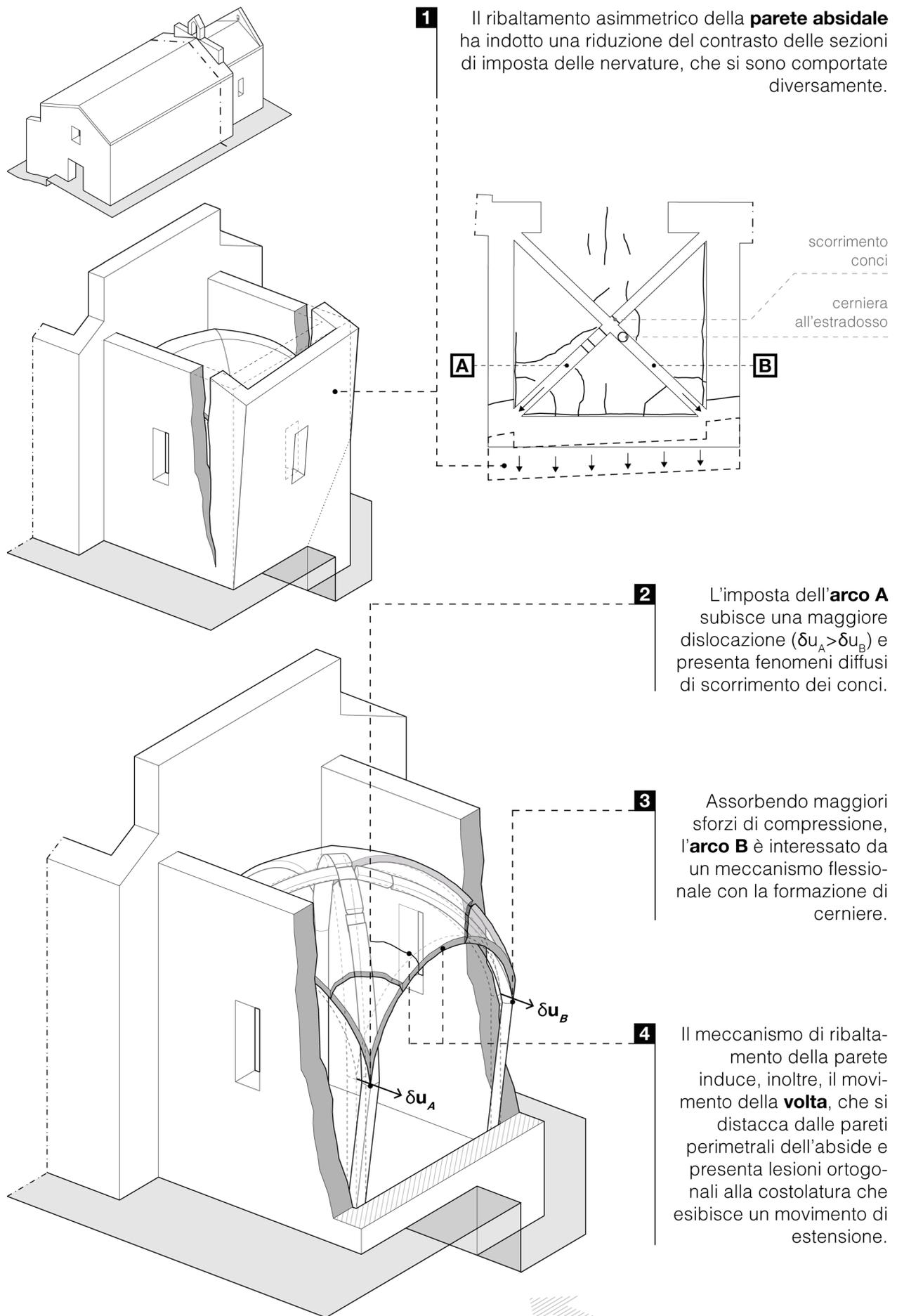
Prospetto sud ovest



Prospetto sud est



9. Chiesa di Santa Maria ad Cryptas interpretazione del danno e cinematismi ●●



Convenzioni grafiche

Rilievo del danno

-  fessurazione
-  distacco superficiale
-  crollo

Interpretazione del danno e cinematismi

- posizione indeformata
- asse di rotazione
- - - linea di sezione
-  superfici lesionate
-  superfici sezionate
-  contesto
-  direzione del moto del suolo

Grado di affidabilità dei meccanismi

- scarsa presenza di fonti
- ● discreta presenza di fonti
- ● ● consistente presenza di fonti

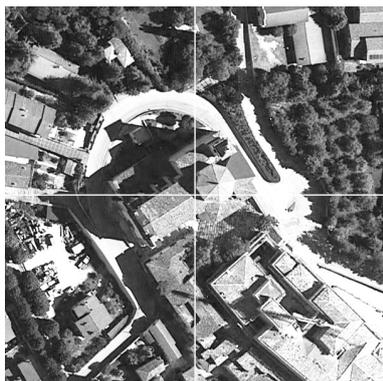
Chiesa di Santa Maria dei Raccomandati

Fonti

1 C. Carocci, C. Tocci, *Rapporto preliminare sulle chiese di San Demetrio Martire, Santa Maria dei Raccomandati, San Giovanni (Comune di San Demetrio ne' Vestini). Note Costruttive. Lettura e interpretazione del danno. Considerazioni sugli interventi di restauro strutturale*, Università di Catania, Dipartimento ASTRA, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, 2009.

2 Le Chiese delle Diocesi Italiane, Chiesa di Santa Maria dei Raccomandati. <https://chieseitaliane.chiesacattolica.it/chieseitaliane/schedacc.jsp?sinteticabool=true&sintetica=true&sercd=1313#>, u.c. gennaio 2024.

11. Chiesa di Santa Maria dei Raccomandati scheda sintetica



Localizzazione

42°17'22.1"N 13°33'28.4"E
Via Madonna dei Raccomandati 2
67028, San Demetrio ne' Vestini (AQ)

Prima fondazione | La chiesa originaria, databile probabilmente tra il XIV e il XV secolo e ormai dismessa, si trova in adiacenza al fianco sinistro dell'attuale chiesa; costituita da un'aula rettangolare di dimensioni ridotte, all'inizio dello scorso secolo è stata oggetto di un intervento di rifacimento del soffitto, realizzato in putrelle e voltine con copertura esterna a una falda, in continuità con quella delle cappelle laterali; nella stessa occasione, la chiesa è stata dotata di un arredo di gusto liberty, datato al 1903. L'edificio ospita ancora oggi l'affresco cinquecentesco della Madonna dei Raccomandati.

Trasformazioni | Ricostruita nel 1820, la chiesa è stata recentemente oggetto di interventi che hanno interessato principalmente il sistema di copertura: in particolare, si evidenzia, la realizzazione di una trave in c.a., posta trasversalmente, tra l'estradosso della volta della navata centrale e l'intradosso delle capriate lignee di copertura; è probabile che risalga alla stessa epoca l'inserimento di un cordolo sommitale in c.a..

Note tipologiche e costruttive | La chiesa, isolata, sorge su un terreno in pendio che ha reso necessaria la realizzazione di un muro di sostegno in pietrame, prospiciente la facciata. L'edificio presenta un impianto ad aula unica con cappelle laterali in corrispondenza delle due campate centrali, di passo maggiore rispetto alle due campate adiacenti al presbiterio e al corpo di facciata, che presentano lateralmente dei vani allungati. Sul lato sinistro dell'aula, dalla seconda delle campate minori, si accede ad un ambiente rettangolare: la Cappella del Sacramento.

Il coro, il transetto e la navata centrale sono superiormente concluse da volte a botte: in particolare, l'ultimo ambiente, in corrispondenza delle due campate maggiori, presenta delle botti lunettate; l'intersezione tra il transetto e la navata è, invece, coperta da una cupola emisferica, impostata su pennacchi di raccordo con i sottostanti arconi di sostegno, su alcuni dei quali sono stati realizzati degli incatenamenti metallici. Le strutture voltate sono caratterizzate da spessori sottili e costituite da concrezione di elementi irregolari. Esternamente, lungo le pareti longitudinali, sono presenti quattro contrafforti murari, corrispondenti ai sottostanti setti di separazione tra le cappelle e gli ambiti laterali, che si elevano per quasi tutta l'altezza dei setti murari. I contrafforti presentano, radiciamenti interni di connessione con le pareti longitudinali della navata. Così realizzati, i contrafforti limitano il fenomeno di martellamento e il ribaltamento, sia interno che esterno, delle pareti. Altri elementi lignei di connessione sono riconoscibili nella facciata principale, nelle pareti del transetto, del coro e della torre campanaria.

La cupola ha impianto esterno ottagonale e presenta, sui lati diagonali, delle aperture che danno luce agli oculi della cupola, posti in corrispondenza dei pennacchi. La copertura della chiesa, realizzata in capriate lignee, è a doppia falda sull'aula, a falde semplici sulle cappelle laterali, a padiglione sul transetto, sul coro e sulla cupola.

L'apparecchio murario visibile sulla parete terminale è costituito da pietre di pezzatura minuta e presenta una discreta attenzione alla orizzontalità delle giaciture e cantonali ben ammorsati.

Adiacente all'ala sinistra del transetto, è presente una torre campanaria, che condivide in parte la parete trasversale di fondo. Il paramento esterno è realizzato in opera quadrata pseudoisodoma nella zona basamentale, nella parte superiore presenta invece blocchi squadrati associati a elementi laterizi.

Interpretazione del danno | Il terremoto del 2009 ha causato danneggiamenti diffusi in quasi tutte le componenti della chiesa.

Tra i danni causati dall'impulso longitudinale del sisma, si evidenzia il ribaltamento della facciata, testimoniato dalle lesioni di taglio presenti sul fianco destro del corpo di facciata e dalle lesioni di distacco, osservabili all'interno della chiesa, tra la facciata, le pareti longitudinali e la volta. Si osserva, inoltre, un ulteriore movimento di ribaltamento che interessa la parte sommitale della facciata, con conseguente crollo parabolico del timpano, che svetta rispetto al punto in cui si innestano le pareti longitudinali della navata. L'impulso longitudinale ha interessato anche la zona prospiciente la chiesa, provocando il crollo del muro di contenimento, inizialmente limitato alla porzione corrispondente all'ingombro della chiesa retrostante e poi esteso lateralmente, dopo le repliche sismiche; è importante evidenziare che questo specifico danno è dovuto principalmente all'importante spinta del terrapieno e alle caratteristiche geotecniche del terreno di fondazione.

Altri danni dovuti all'impulso longitudinale si riscontrano nella torre campanaria, che presenta una lesione di taglio che si estende dalla base fino alla quota della copertura del transetto, coinvolgendone parzialmente anche le murature. Anche le pareti longitudinali della navata sono interessate da lesioni di taglio, in particolare localizzate in corrispondenza delle campate maggiori e sopra gli archi di accesso delle cappelle.

I sistemi voltati interni all'edificio presentano un quadro fessurativo diffuso. In particolare, la seconda campata maggiore della chiesa, voltata a botte lunettata, ha subito un crollo che interessa la zona centrale, fino all'innesto delle lunette. Analogamente, anche la volta del coro è stata oggetto di un crollo parziale. Nella volta della navata, la lesione intradossale in chiave, che si estende per quasi tutta la lunghezza della stessa, presenta una maggiore ampiezza in corrispondenza della prima campata e dell'arco adiacente la porzione crollata verso il transetto; sono presenti, infine, lesioni intradossali anche in corrispondenza delle reni, dovute dall'impulso trasversale, che ha innescato la formazione di un meccanismo di collasso flessionale negli archi e nelle volte a botte della navata. In particolare, la presenza di lesioni intradossali alle reni nelle campate maggiori (che, secondo il più classico meccanismo flessionale, dovrebbero comparire all'estradosso) è giustificabile per la presenza delle lunette: le lesioni che appaiono all'intradosso corrispondono, infatti, a lesioni estradosso sugli archi di separazione tra le lunette stesse; sono, quindi, riconducibili alle lesioni di Sabouret.

Il meccanismo sopra descritto è correlato alle lesioni di taglio e di distacco localizzate sui due contrafforti simmetrici, posti in corrispondenza della parete di separazione tra le campate maggiori, il cui movimento è probabilmente dovuto alla eccessiva snellezza. Anche le volte del transetto presentano in chiave lesioni di distacco dalle pareti verticali laterali.

La cupola presbiteriale è, invece, percorsa da lesioni lungo i meridiani, prevalentemente disposte in corrispondenza dei pennacchi, giustificabili dal più comune meccanismo delle strutture cupolate, proprio del loro comportamento strutturale, che vede il sorgere di sforzi di tensione alla base della struttura e la conseguente formazione di questo tipo di lesioni in caso di cedimento delle imposte. Altre lesioni circolari sono osservabili nella struttura e interessano la porzione sovrastante le finestre circolari.

In conclusione, entrambe le direzioni dell'impulso sismico hanno provocato ingenti danni alla struttura ma, dal rilievo del quadro fessurativo, è possibile assegnare una maggiore intensità all'impulso longitudinale.



Fonti

Prospetto principale
esposto a sud ovest e
muro di contenimento
antistante. **1**



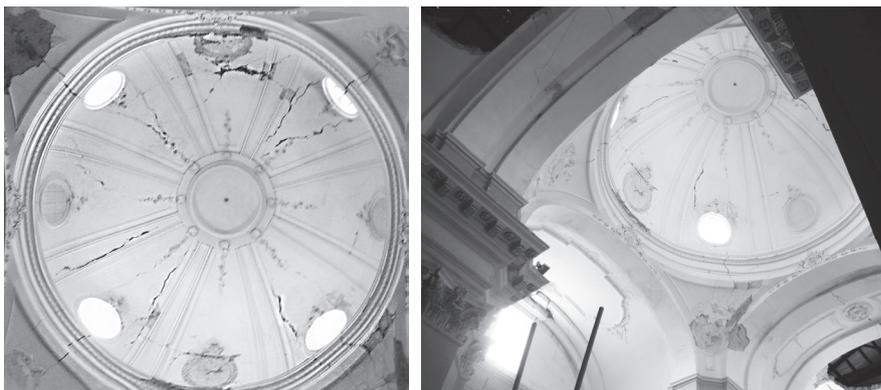
Prospetto nord est
contraffortato e fianco
laterale esposto a
nord ovest e muro
di contenimento anti-
stante. **1**



Prospetto interno. **1**

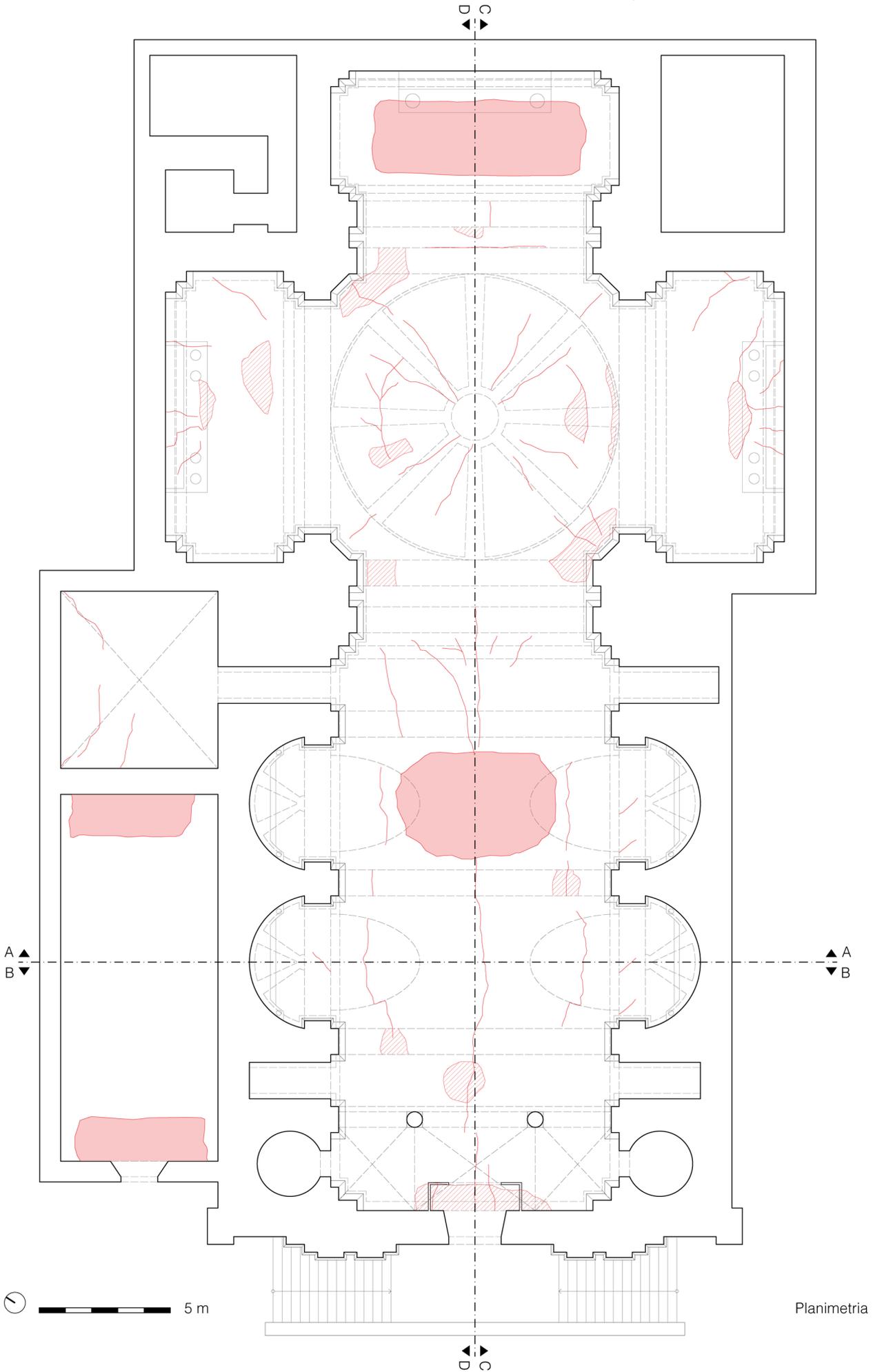


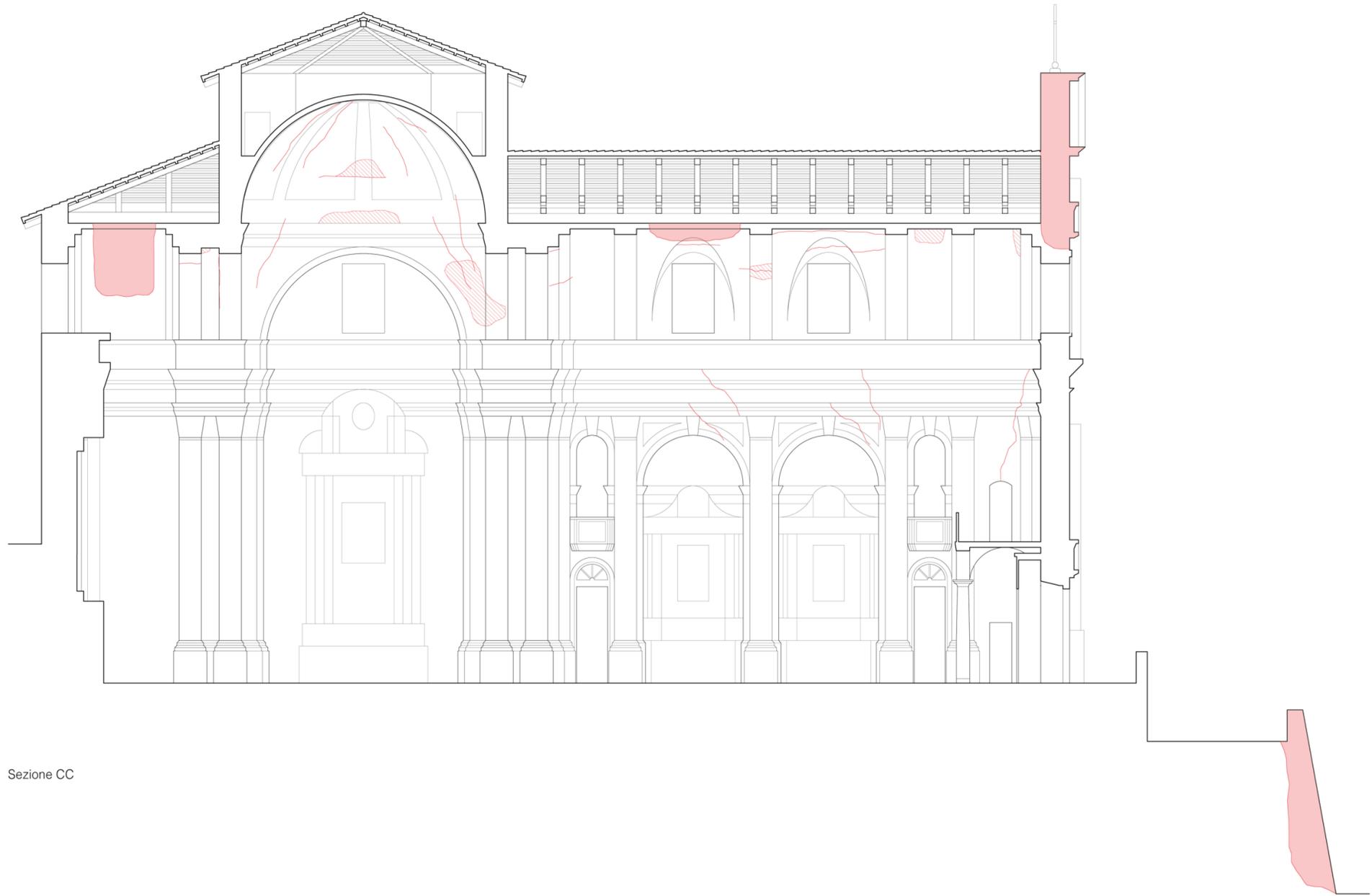
Vista interna del crolli
delle volte a botte
della navata centrale
e del coro. **1**



Cupola emisferica
presbiteriale. **1**

11. Chiesa di Santa Maria dei Raccomandati rilievo del danno, 1:200

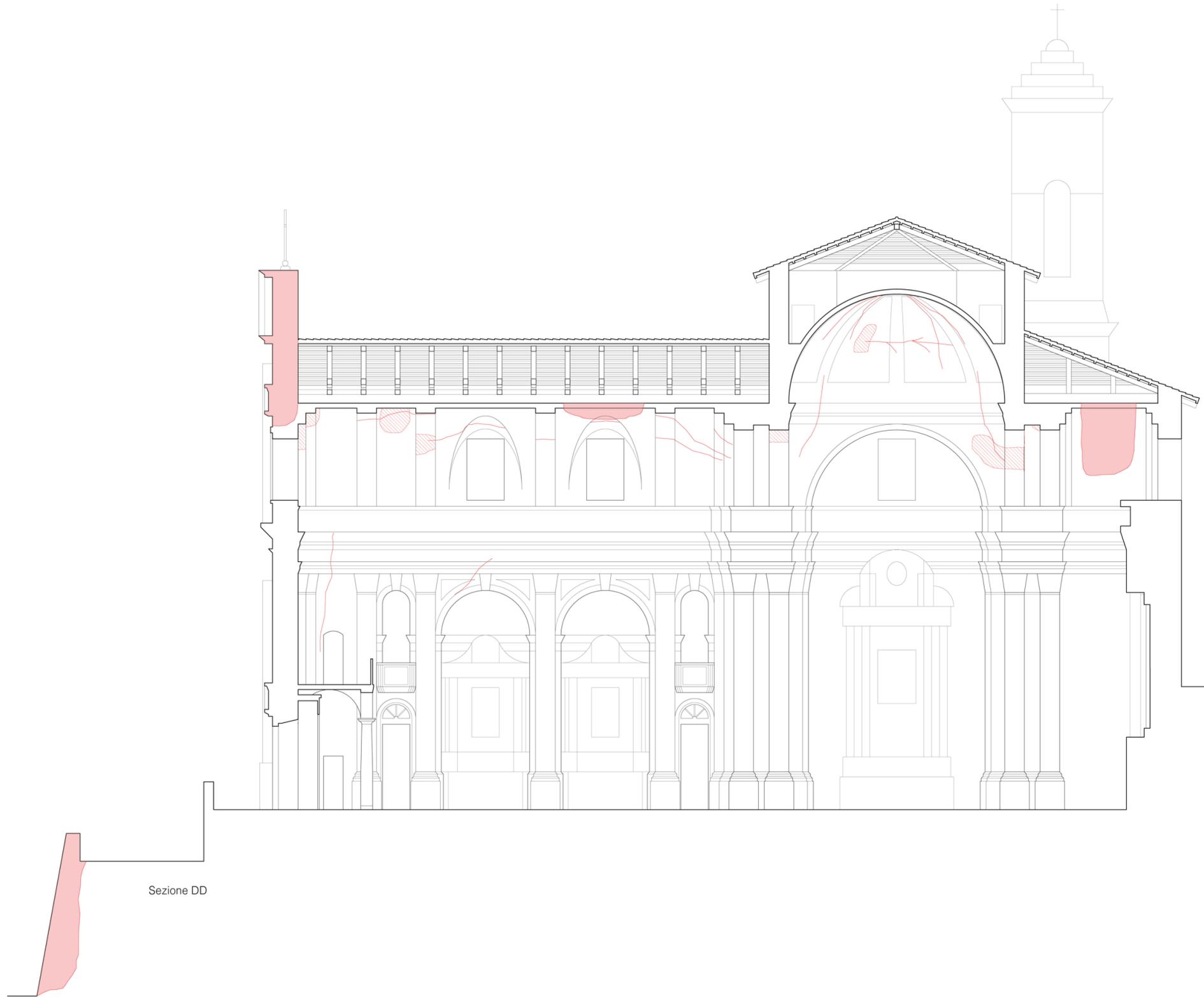




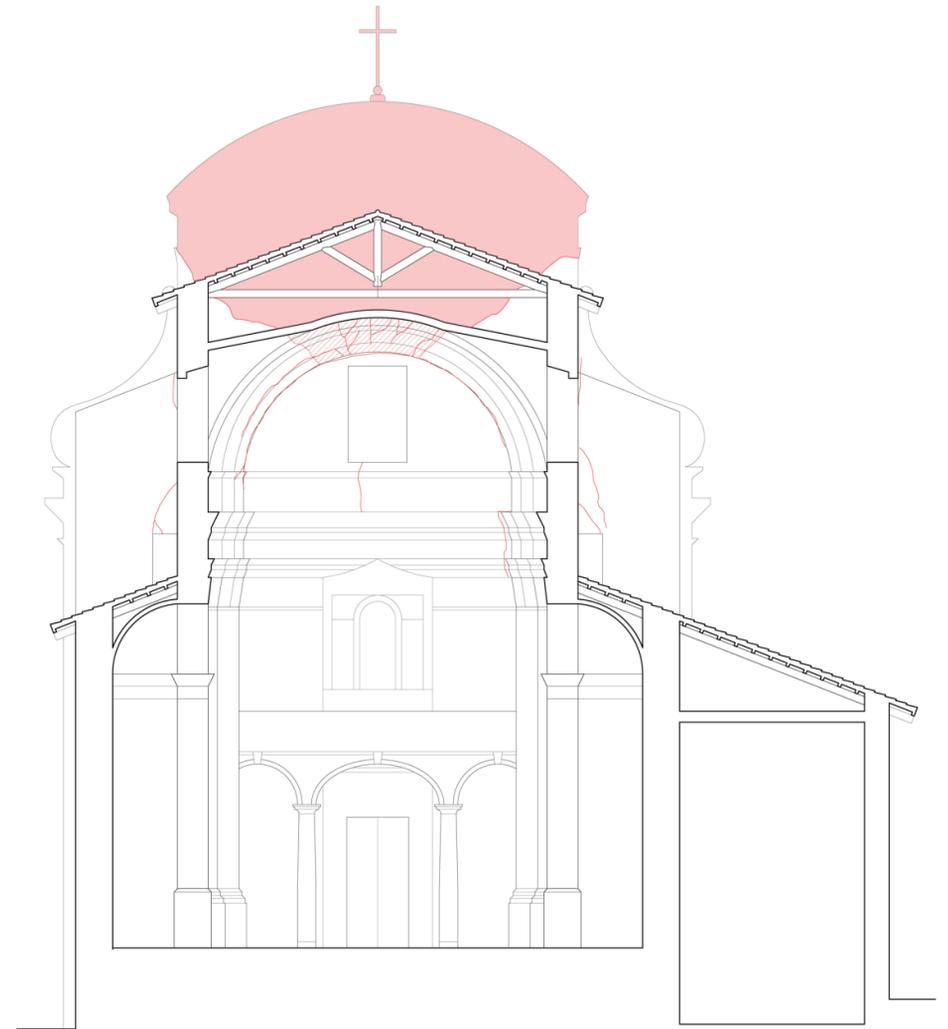
Sezione CC



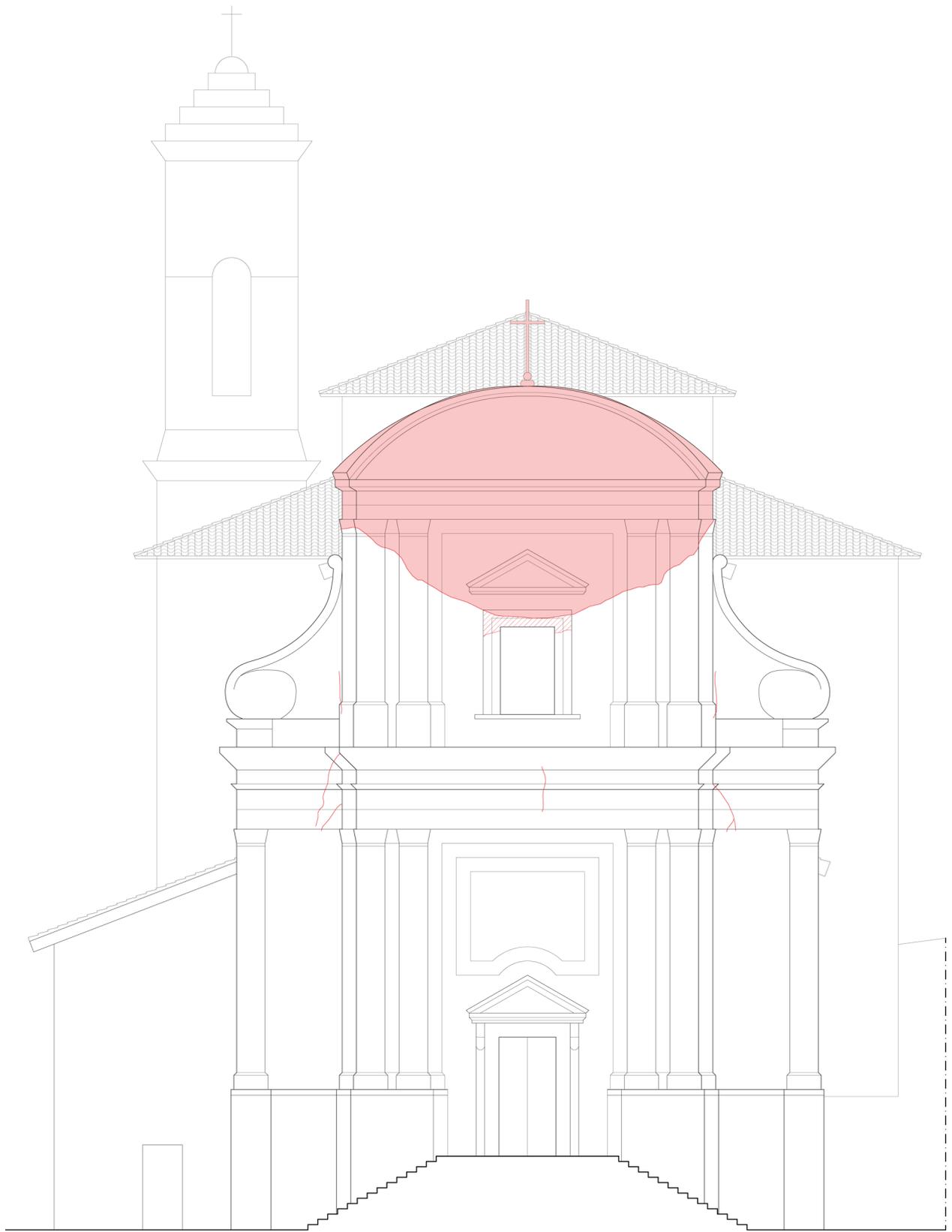
Sezione AA



Sezione DD

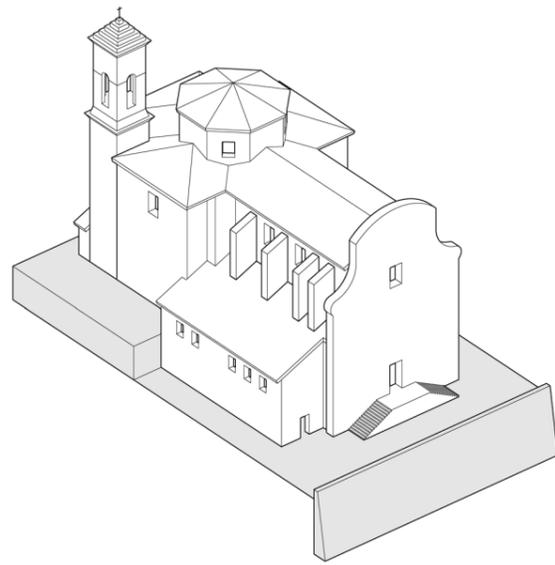


Sezione BB



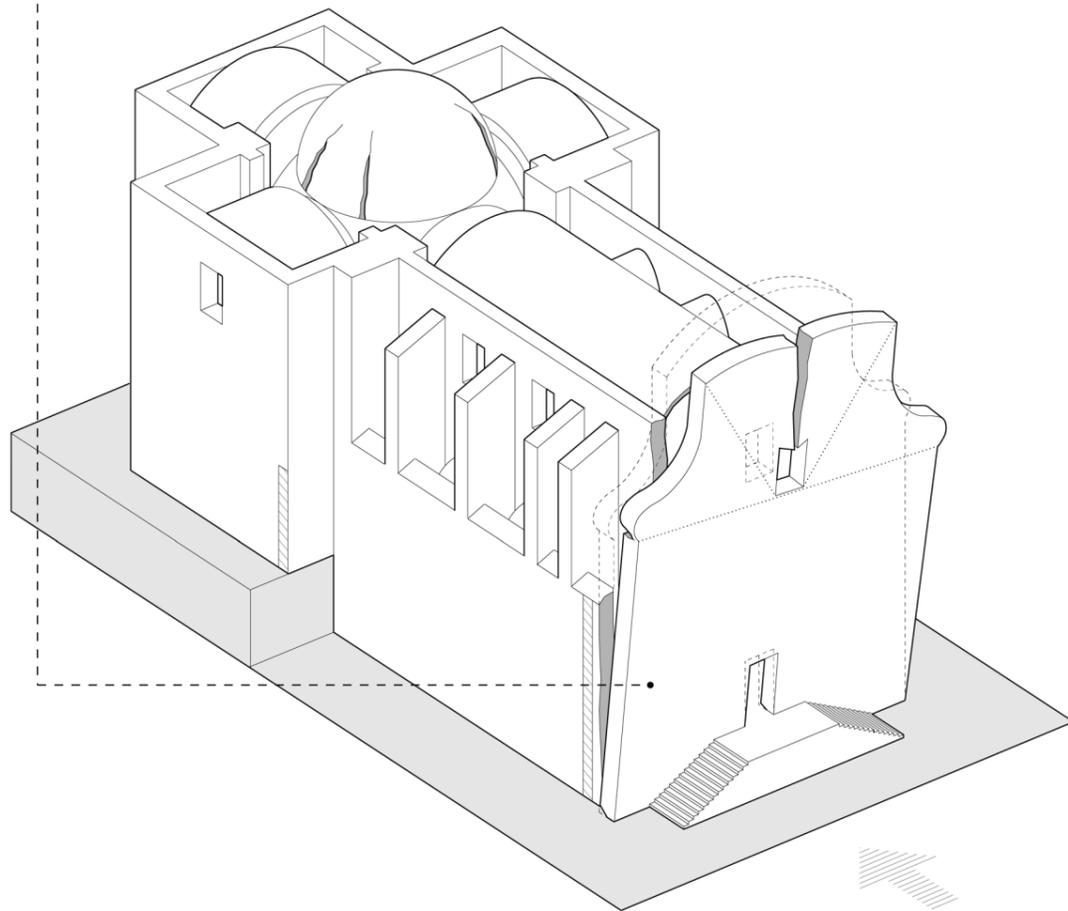
Prospetto sud ovest

11. Chiesa di Santa Maria dei Raccomandati interpretazione del danno e cinematismi ••

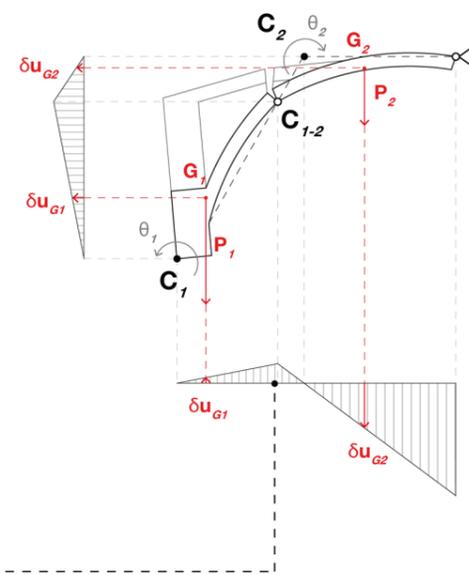


1 Dall'interpretazione del quadro fessurativo rilevato, è possibile osservare ingenti danni causati da un **impulso sismico** agente con medesima intensità in direzione sia **trasversale** che **longitudinale**. L'individuazione di una direzione prevalente dell'azione sismica deve, infatti, essere sempre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

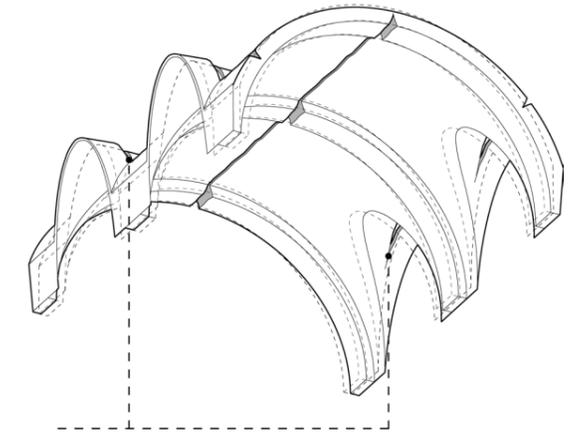
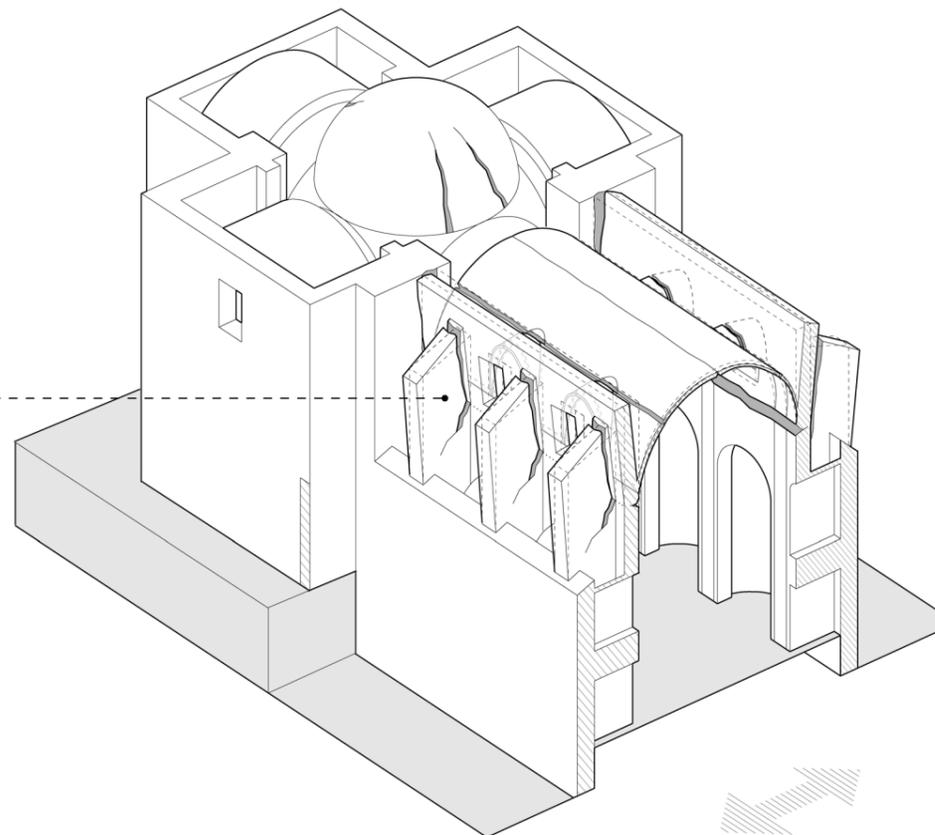
2 Il principale danno riconducibile all'impulso sismico in direzione longitudinale è il **ribaltamento simmetrico della facciata**. È possibile riconoscere due ulteriori movimenti fuori piano del secondo ordine dello stesso elemento e della porzione sommitale, con conseguente **crollo parabolico del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



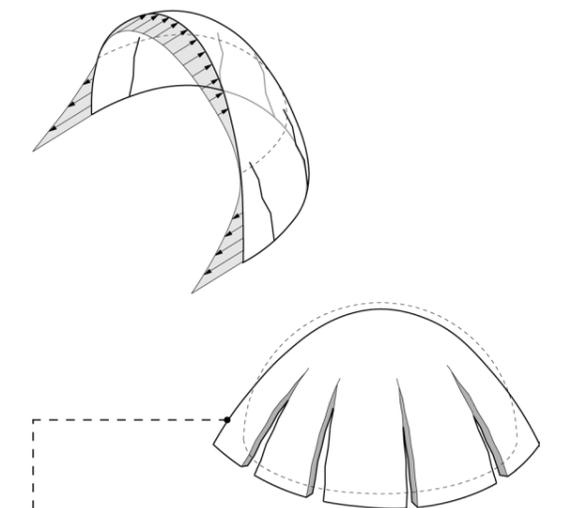
3 L'impulso trasversale ha causato il **movimento dei contrafforti**, che presentano lesioni di taglio, e il conseguente **movimento fuori piano delle pareti longitudinali**. Il cedimento delle strutture di imposta ha innescato un **meccanismo di collasso flessionale simmetrico degli archi e della volta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

3.5 Classificazione dei meccanismi di danno

L'analisi sistematica delle strutture voltate negli edifici religiosi ha consentito l'identificazione di meccanismi di danno ricorrenti, coerentemente con la logica che ha condotto alla stesura delle odierne norme antisismiche: *“le modalità costruttive degli edifici in muratura, pur essendo caratterizzate da un elevatissimo numero di varianti, presentano una costante organizzativa dovuta a una «matrice riconoscibile che ne rivela la logica semplice e al tempo stesso ripetitiva e generalizzabile»²⁷*. In particolare, è stato possibile definire quattro tipologie di meccanismi attivati nei sistemi voltati delle chiese del territorio aquilano (di cui le analisi sopra riportate sono esemplificative) riconducibili a cinematismi frequentemente affrontati nella letteratura. L'analisi sui casi studio ha consentito, inoltre, di riconoscere i medesimi meccanismi anche in numerose altre chiese aquilane, mediante l'osservazione del danno riportato.

²⁷ C. Galli, *Precedenti storici... op. cit.*, p. 4.

3.5.1 Meccanismo flessionale

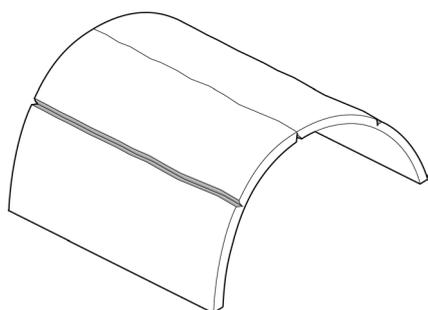


Fig. 3.8, Meccanismo flessionale. Elaborato dell'autore.

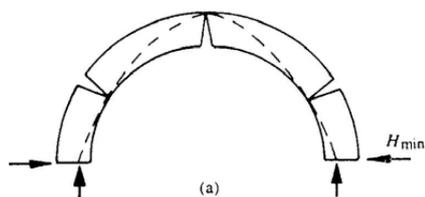


Fig. 3.9, Meccanismo flessionale nel caso di minima spinta agli appoggi. J. Heyman, *Lo scheletro...* op. cit., p. 21.

Identificato per primo da Couplet, il meccanismo flessionale (fig. 3.8) si manifesta con la fessurazione della struttura e la conseguente formazione di quattro cerniere plastiche: la consistenza del danno, e quindi l'eventuale collasso della struttura, dipende principalmente dall'entità dello spostamento delle imposte e dallo spessore dell'arco o della volta. Entrambi tali fattori possono determinare, infatti, la fuoriuscita della funicolare dei carichi dallo spessore murario, con la conseguente comparsa di sforzi di trazione, a cui il materiale non può opporre resistenza. La posizione delle cerniere plastiche in condizioni statiche, nel caso di minima spinta agli appoggi, è simmetrica: si osserva la formazione di due cerniere simmetriche intradossali poste alle reni e una estradossale in chiave (fig. 3.9). In condizioni dinamiche, invece, è possibile distinguere due casi: nel caso in cui l'azione sismica produca oscillazioni sincrone, il quadro fessurativo osservabile è il medesimo rispetto a quello sopra descritto; nel caso, invece, in cui le oscillazioni prodotte siano asincrone la posizione delle cerniere formatesi è asimmetrica, diversamente, quindi, rispetto alla configurazione della struttura soggetta unicamente al peso proprio.

Essa può, infine, essere influenzata da eventuali imprecisioni costruttive, causate sia da sviste in fase di realizzazione sia da eventuali difformità derivati da precedenti dissesti.

Tale tipologia di danno è tipicamente osservabile

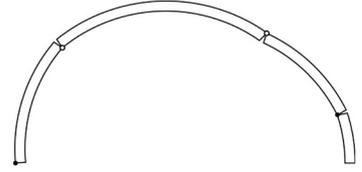
negli archi e nelle volte a botte, il cui comportamento meccanico, come già detto, può essere assimilato a quello di un fascio improprio di archi. In particolare, il cinematismo interessa principalmente le aule allungate, con una dimensione prevalente sull'altra, in cui la direzione trasversale, se non adeguatamente contraffortata, risulta evidentemente essere più vulnerabile rispetto a quella longitudinale.

Tra le chiese analizzate, le volte a botte presenti nelle chiese di San Marco (figg. 3.10, 3.11, 3.12) e di Santa Maria dei Raccomandati (figg. 3.13, 3.14, 3.15) sono state interessate da tale meccanismo, con formazione di cerniere asimmetriche nel primo caso e simmetriche nel secondo. In particolare, nella seconda chiesa, la volta a botte è lunettata: le unghie delle lunette sono analoghe a quelle che compongono le volte a crociera e presentano le medesime lesioni che, nel primo capitolo, sono state descritte come lesioni di Sabouret. Altre chiese che hanno esibito tale cinematismo sono state le chiese di Santa Maria Paganica (figg. 3.16, 3.17, 3.18, 3.19, 3.20), sul cui movimento ha particolarmente influito la stratificazione di tecniche costruttive presenti nell'organismo ibrido²⁸, e di Santa Margherita (figg. 3.21, 3.22, 3.23, 3.24), in cui anche l'interpretazione del quadro fessurativo dei contrafforti consente di risalire al medesimo movimento trasversale²⁹.

28 La navata principale della chiesa presenta una volta a botte, realizzata prevalentemente in camorcanna, con arconi laterizi; è possibile osservare un sistema di pendagliatura metallica per il sostegno della volta, ancorato alle catene lignee, unico elemento conservato della struttura di copertura originaria, sostituita nella seconda metà del novecento con una struttura in c.a.. L'interazione tra le varie tecniche costruttive non è tuttavia chiara. C. Carocci, S. Cattari, C. Circo, S. Lagomarsino, C. Tocci, *The case study of Santa Maria Paganica church damaged by L'Aquila earthquake*, «Advanced Materials Research», 133-134, 2010, pp. 163-168; C. Carocci, S. Cattari, S. Lagomarsino, C. Tocci, *Chiesa di Santa Maria Paganica (L'Aquila). Note storiche e costruttive. Lettura del danno e della vulnerabilità. Considerazioni sul restauro e la ricostruzione*, Università di Catania, Università degli Studi di Genova, Università degli Studi di Roma; N. Augenti, 2009.

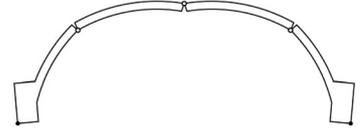
29 G. Cacciaguerra, M. Piazza, M. P. Gatti, R. Tomasi, D. Zonta, *La chiesa di S. Margherita dei padri gesuiti a L'Aquila*, Università degli Studi di Trento, Facoltà di Ingegneria, 2009.

San Marco



Figg. 3.10-3.12, Meccanismo flessionale asimmetrico attivato negli arconi della navata centrale e conseguente crollo del fianco sinistro. L. Binda et al., *Chiesa di San Marco... op. cit.*

Santa Maria dei Raccomandati



Figg. 3.13- 3.15, Meccanismo flessionale simmetrico attivato nella volta a botte della navata centrale e quadro fessurativo causato. C. Carocci, C. Tocci, *Rapporto preliminare sulle chiese... op. cit.*

Santa Maria Paganica



Figg. 3.16-3.20, Viste aeree, interna, dei contrafforti della facciata prospiciente la piazza e del sistema di copertura. C. Carocci, S. Cattari, S. Lagomarsino, C. Tocci, *Chiesa di Santa Maria... op. cit.*

Santa Margherita



Figg. 3.21-3.24, Quadro fessurativo della volta della navata centrale e dei contrafforti esterni che testimoniano il movimento trasversale. G. Cacciaguerra, M. Piazza, M. P. Gatti, R. Tomasi, D. Zonta, *La chiesa di S. Margherita... op. cit.*

3.5.II “a modo di mela granata”³⁰

Relativamente alle strutture a cupola, il meccanismo più noto è quello usato per la prima volta nell'interpretazione dei dissesti della cupola di San Pietro e meccanicamente chiarito da Heyman. Causato dal cedimento del piano di imposta, il cinematicismo prevede la suddivisione della cupola in spicchi, simili alle spaccature *a modo di mela granata* (fig. 3.25), invocate dai tre matematici per rendere più intuitiva la comprensione della dinamica di rottura della cupola. Le lesioni, disposte lungo i meridiani della struttura, si osservano a partire da un valore di colatitudine che, pur dipendendo dal rapporto di snellezza della cupola, è approssimabile a 25° e si estendono fino alla base della struttura, dove l'ampiezza è massima (figg. 3.26, 3.27). La disposizione meridiana delle lesioni è dovuta all'insorgere di sforzi di trazione lungo i paralleli, tanto maggiori quanto più vicini all'imposta della cupola, dove lo spostamento è massimo. Tra le chiese analizzate, la cupola presbiteriale della chiesa di Santa Maria dei Raccomandati presenta questa tipologia di lesioni (fig. 3.28).

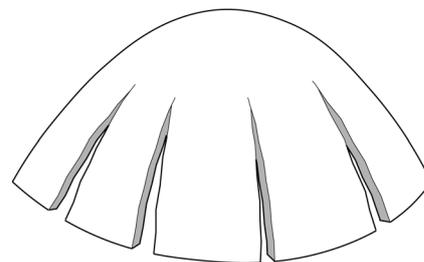
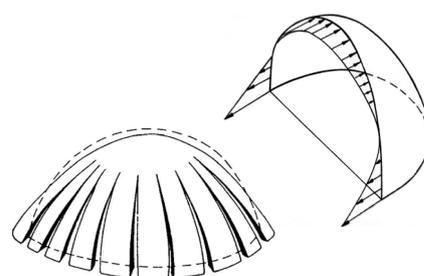
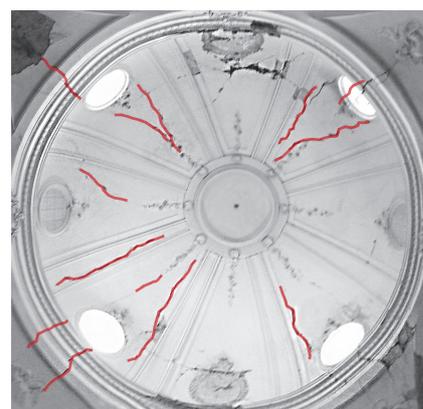


Fig. 3.25, Cinematicismo “a modo di mela granata”. Elaborato dell'autore.

30 F. Jacquier, T. Le Seur, R. G. Boscovich, *Parere di tre matematici...* op. cit., in D. Capocchi (a cura di), *Perizie di Statica...* op. cit., p. 101.



Figg. 3.26, 3.27, “Risultante degli sforzi circolari necessari per l'equilibrio di un guscio sferico” e conseguente fessurazione. J. Heyman, *Lo scheletro...* op. cit., pp. 39-40.



Santa Maria dei Raccomandati

Fig. 3.28, Lesioni disposte lungo i meridiani della cupola presbiteriale della chiesa di Santa Maria dei Raccomandati. C. Carocci, C. Tocci, *Rapporto preliminare sulle chiese...* op. cit.

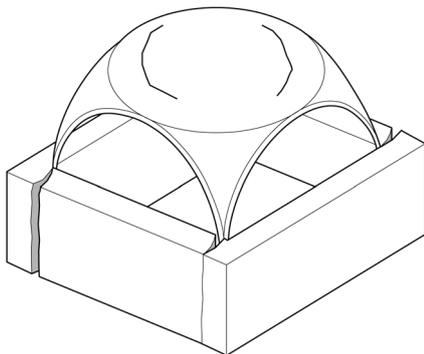


Fig. 3.29, Scorrimento orizzontale del piano di imposta della volta causata dal movimento relativo delle strutture sottostanti. Elaborato dell'autore.

31 G. Brandonisio, G. Lucibello, E. Mele, A. De Luca, *Damage and performance evaluation of masonry churches in the 2009 L'Aquila earthquake*, «Engineering Failure Analysis», 34, 2013, pp. 693-714; G. Lucibello, G. Brandonisio, E. Mele, A. De Luca, *Comportamento sismico di edifici monumentali a pianta basilicale in seguito al sisma Abruzzo'09: Quattro casi di studio*, XIV Convegno ANIDIS, L'ingegneria sismica in Italia, Bari, 2011; G. Lucibello, G. Brandonisio, E. Mele, A. De Luca, *Seismic behavior of some basilica churches after L'Aquila 2009 earthquake*, «Advanced Materials Research», 133-134, 2010, pp. 801-806.

32 CNR-ITC, *Casi studio: Chiesa di San Felice Martire a Poggio Pienze*, CNR.

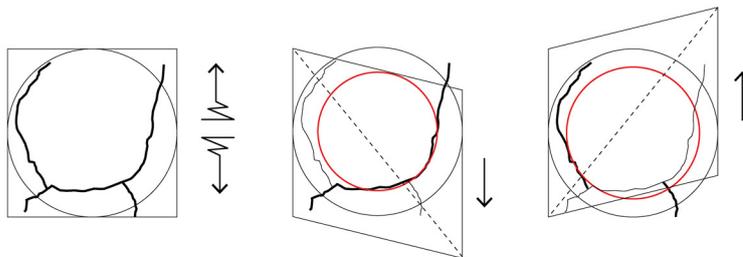
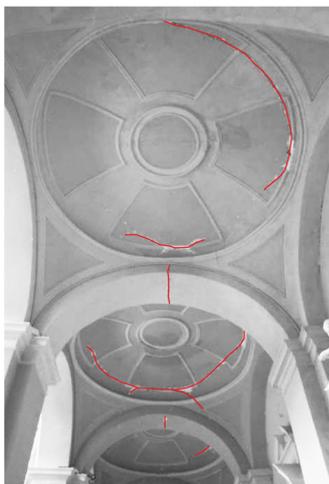
3.5.III Scorrimento orizzontale

La terza tipologia di meccanismo di danno identificata è causata dal movimento relativo delle strutture che sorreggono il sistema voltato, con scorrimenti rigidi del loro piano orizzontale di imposta (fig. 3.29). Il movimento differenziale tra le strutture può essere imputabile a differenze nei vincoli esterni oppure a differenti caratteristiche di rigidità degli elementi. Il meccanismo determina la deformazione diagonale dell'impianto geometrico del sistema voltato, con la formazione di lesioni ortogonali alla direzione di massima estensione. In particolare, tra i casi precedentemente approfonditi, nelle chiese di San Giuseppe Artigiano (figg. 3.30, 3.31) e Santa Maria degli Angeli (fig. 3.32), le volte a vela ribassate su impianto quadrato mostrano lesioni con andamento circolare (coerentemente con il modo di vibrare torsionale delle cupole) ortogonali alle diagonali che, alternativamente subiscono il movimento estensivo; nella chiesa di Santa Maria ad Cryptas (fig. 3.33), la volta a vela che caratterizza lo spazio absidale presenta, oltre le lesioni perpendicolari agli sforzi di trazione nelle porzioni delle unghie, danni agli archi diagonali causati dal cedimento dell'imposta. In generale, è possibile affermare che tale meccanismo interessa gli edifici, o porzioni degli stessi, caratterizzati da un impianto compatto. Altre chiese del territorio aquilano in cui si è attivato il medesimo cinematismo sono la chiesa di Santa Giusta³¹ (figg. 3.34, 3.35, 3.36, 3.37) e di San Felice Martire³² (fig. 3.38), i cui casi sono facilmente riconducibili a quello

di San Giuseppe Artigiano, interessando le volte a vela ribassate delle nevate laterali, e la chiesa di San Giovanni³³ (figg. 3.39, 3.40) nel comune di San Demetrio ne Vestini.

33 C. Carocci, C. Tocci, *Rapporto preliminare sulle chiese di San Demetrio Martire, Santa Maria dei Raccomandati, San Giovanni (Comune di San Demetrio ne' Vestini). Note Costruttive. Lettura e interpretazione del danno. Considerazioni sugli interventi di restauro strutturale*, Università di Catania, Dipartimento ASTRA, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica.

San Giuseppe Artigiano



Figg. 3.30-3.31, Lesioni circolari nelle volte a vela ribassate delle navate laterali. Archivio Sintecna.s.r.l..

Santa Maria degli Angeli



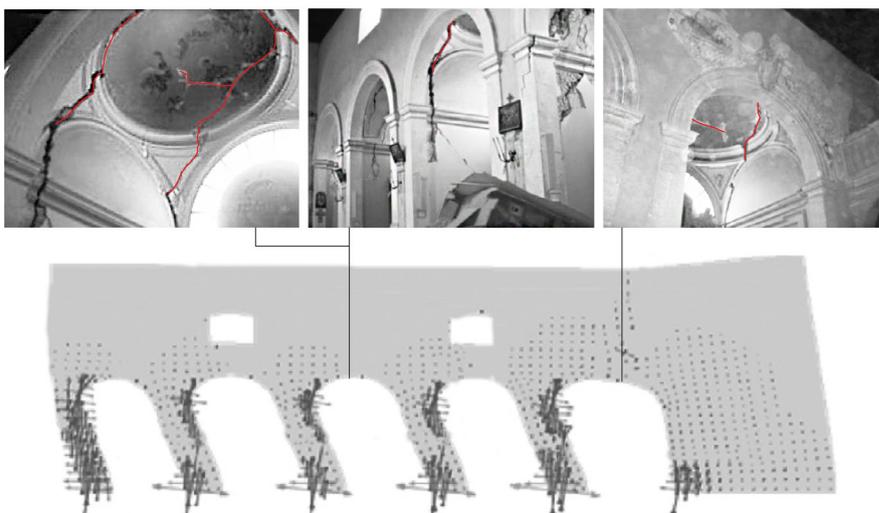
Fig. 3.32, Lesioni circolari nella volta a vela ribassata absidale. E. Giuriani, *Relazione Santa Maria... op. cit.*

Santa Maria ad Cryptas



Fig. 3.33, Le nervature della volta a crociera absidale della chiesa presentano fenomeni diffusi di scorrimento dei conci nella porzione in chiave. F. De Cesaris et al., *Chiesa di S. Maria... op. cit.*

Santa Giusta



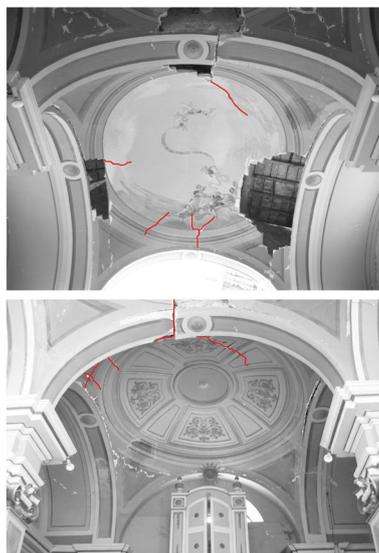
Figg. 3.34-3.37, Analisi dinamica modale del macroelemento delle arcate e confronto con i danni riportati dalle volte a vela ribassate delle navate laterali. G. Brandonisio, G. Lucibello, E. Mele, A. De Luca, *Damage and performance... op. cit.*, p. 711.

San Felice Martire



Fig. 3.38, Lesioni circolari nelle volte a vela ribassate delle navate laterali. CNR-ITC, *Casi studio... op. cit.*

San Giovanni



Figg. 3.39-3.40, Lesioni delle volte a vela ribassate. C. Carocci, C. Tocci, *Rapporto preliminare sulle chiese... op. cit.*

3.5.IV Archi “nascosti”

L'ultimo meccanismo ricorrente richiama un più ampio tema di riflessione, che riguarda le generalità delle costruzioni murarie e non solo i sistemi voltati, ed è quello delle strutture *nascoste* (3.41). Di Pasquale³⁴ distingue tra “*costruzione*” e “*struttura*”, definendo la prima come l'oggetto murario nella sua interezza e la seconda come “*la parte attiva [che] muta al mutare delle azioni esterne*”³⁵. “*Il sistema di carichi individua una struttura la cui linea d'asse è pressoché parabolica; intorno a questa linea sta il materiale reagente che assume la forma di un arco. [...] la parte di materiale che funge da struttura, sollecitata dalle azioni interne, si deforma [...] mentre ciò che resta, essendo inerte, non può deformarsi: le fratture rappresentano le linee di separazione tra le parti inerti e le parti reagenti*”³⁶.

Heyman propone una analoga distinzione assumendola come fondamento meccanico dell'identità strutturale tra architettura greca e architettura gotica: entrambe accomunate dallo stesso funzionamento ad arco che nella prima è dissimulato o, meglio, nascosto all'interno della logica trilitica (fig. 3.42)³⁷. In definitiva, all'interno di ogni costruzione muraria, la struttura reagente si configura come un insieme di strutture ad arco, la cui disposizione non è definibile a priori ma dipende dalle sollecitazioni esterne a cui l'organismo murario deve rispondere.

Nell'ultima tipologia di meccanismi di danno osservati, il rilievo del danno mostra un quadro fessurativo in cui le lesioni si sviluppano lungo archi inclinati

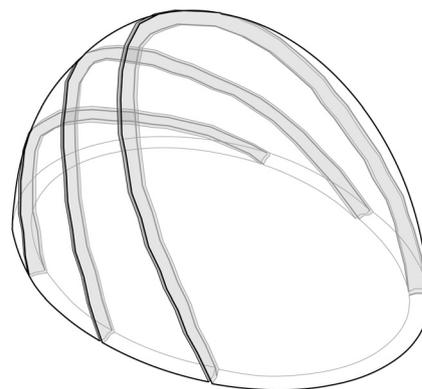


Fig. 3.41, Archi virtuali, “*struttura*” interna alla “*costruzione*” della cupola. Elaborato dell'autore.

34 Di Pasquale sviluppa a riguardo una disamina di natura meccanica e storica, citando alcuni degli studiosi che per primi si cimentarono nell'analisi di tale tematica, quali Viollet-le-Duc, Sabouret, Abraham, Choisy per arrivare poi a Nervi. S. Di Pasquale, *L'arte del costruire... op. cit.*, Capitolo 5.

35 *Idem*, p. 410.

36 *Idem*, p. 413.

37 J. Heyman, “*Gothic*” *Construction in Ancient Greece*, «*Journal of the Society of Architectural Historians*», 31, 1, 1972, pp. 3-9.

38 G. Cangì, *Manuale del consolidamento e restauro: archi e volte*, DEI Tipografia del Genio Civile, Roma, 2023, Capitoli 1 e 5.

39 *Idem*, p. 28.

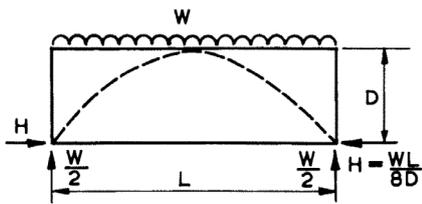
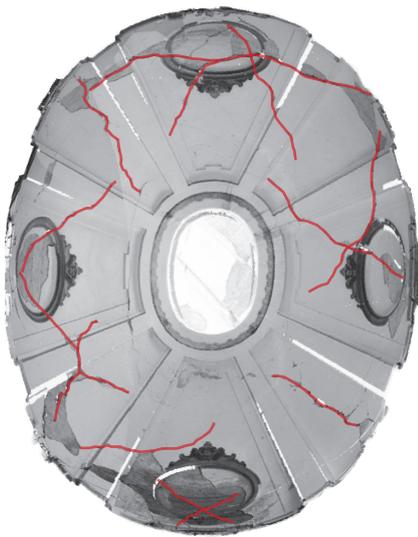
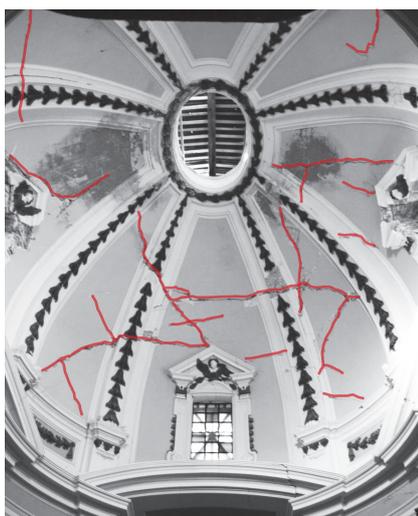


Fig. 3.42, Analisi dei flussi di forze agenti all'interno dell'architrave del Tempio di Aphaia a Egina. J. Heyman, "Gothic" Construction... op. cit., p. 6.



Sant'Agostino

Fig. 3.43, Lesioni della cupola della chiesa di Sant'Agostino. C. Calderini, S. Lagomarsino, Chiesa di Sant'Agostino... op. cit..



Santa Caterina

Fig. 3.44, Lesioni della cupola della chiesa di Santa Caterina. <https://stagisrl.com/portfolio/chiesa-santa-caterina-dalessandria/>

che percorrono, con diverse angolazioni, le cupole a partire dal piano di imposta. Cangini³⁸ definisce tali strutture nascoste come *archi virtuali* e afferma, nel caso delle cupole, che, sfruttando la prerogativa dettata dalla doppia curvatura che consente di innescare meccanismi spaziali, "i flussi di compressione che seguono il volume della cupola vengono deviati sui punti più stabili della struttura"³⁹, verificandosi così la formazione *spontanea* di archi di *riequilibrio*.

Tra le chiese del territorio aquilano analizzate, il meccanismo è stato rilevato in Sant'Agostino (fig. 3.43) e Santa Caterina (fig. 3.44), entrambe caratterizzate dalla presenza di un'importante cupola ellittica che copre l'aula principale.



Conclusioni

Ciò di cui fino ad ora si è discusso concerne le osservazioni, le analisi e le riflessioni che è bene tenere in considerazione nella fase che precede il progetto di restauro di un edificio di interesse storico architettonico, nella consapevolezza che il suo valore storico, artistico, costruttivo, concetti sottesi tutti al più ampio interesse architettonico, devono costituire la base del progetto di restauro; “*La loro [degli edifici] consistenza storica è la matrice del cambiamento*”¹. Osservare e comprendere l’edificio costituisce presupposto fondamentale per progettare soluzioni corrette che non ne snaturino i caratteri tipologici, costruttivi e figurativi, e ne garantiscano la persistenza, la stabilità, la fruizione e, quindi, la valorizzazione e la tutela.

Per fare ciò, come si è detto, è quindi fondamentale conoscere e capire l’evoluzione dell’edificio, le vicissitudini che hanno portato alla sua fondazione e le eventuali trasformazioni funzionali subite, le tecnologie impiegate e le logiche costruttive con cui l’organismo strutturale è stato concepito. Il tema trattato dalla ricerca affronta il caso specifico in cui la gestione di tutti i parametri da valutare per svolgere un corretto progetto di restauro è ostica, perché il tempo necessario per svolgere tali analisi si riduce drasticamente essendo il dissesto dell’edificio provocato non dalla trascuratezza umana o da un difetto costruttivo ma da un evento incontrollabile: il terremoto. Nonostante l’imprevedibilità connaturata al fenomeno sismico,

¹ C. Carocci, C. Tocci (a cura di), *Antonino Giuffrè. Leggendo... op. cit.*, p. 39.

2 DPCM n. 185 del 23/02/2006, pubblicato sulla G.U. n. 55 del 07/03/2006.

3 C. Carocci, C. Tocci (a cura di), *Antonino Giuffrè. Leggendo... op. cit.*, p. 36.

grazie ai moderni studi di geodinamica e relativi alla sismicità storica, è possibile effettuare stime probabilistiche che forniscono ottime basi per la progettazione in zone ad alta pericolosità sismica. Anche le attività da svolgere durante la fase di emergenza sono ormai supportate da adeguati strumenti, sviluppati nel corso degli ultimi decenni, che hanno consentito di pianificare in maniera strategica le attività di rilievo e messa in sicurezza del patrimonio culturale.

Il Modello A-DC, ultimo strumento fornito dalla normativa², consente di standardizzare il lavoro di rilievo del danno degli edifici religiosi fornendo in tempi ridotti i primi dati concreti relativi allo stato dell'edificio (grado di agibilità, possibili interventi di messa in sicurezza e una prima stima dei finanziamenti da allocare). La grande potenzialità dello strumento consiste però nella possibilità di sistematizzare i meccanismi di danno attivati (o attivabili) negli edifici, sfruttando il linguaggio standardizzato impiegato: *“non è il singolo caso che ci interessa documentare, bensì l'idea che tutti li sottende”*³; l'individuazione di 28 cinematismi ricorrenti, oltre a essere particolarmente efficace nella fase emergenziale, si dimostra preziosa anche per l'analisi del comportamento strutturale dell'organismo murario. Tuttavia, diverse sono le critiche emerse durante gli ultimi decenni relative alla compilazione della scheda, principalmente dovute alla mancata aderenza riscontrata tra la realtà e le schematizzazioni tabellari, che costringe a ricorrere a valutazioni soggettive, compromettendo così la validità del confronto tra meccanismi osservati per

In copertina: Fiaccolata a L'Aquila in occasione del quattordicesimo anniversario del terremoto. <https://abruzzoweb.it/terremoto-laquila-14esimo-anniversario-il-programma-delle-cerimonie/>

differenti eventi sismici, in differenti luoghi e tempi. Il perfezionamento di tali strumenti normativi presenta non poche difficoltà: la necessità di mediare tra le approfondite analisi che richiederebbe un adeguato intervento di messa in sicurezza e la prontezza con cui tali indagini devono essere svolte da tecnici, anche non specializzati nel settore, in fase emergenziale rappresenta un difficile compromesso. Nonostante ciò, è forse possibile ipotizzare un margine di miglioramento riducendo gli elementi funzionali che la normativa richiede di identificare, che potrebbero non trovare corrispettivo nella realtà, tentando di definire, invece, una casistica più estesa di elementi architettonici corredati da un più ampio ventaglio di meccanismi, che consenta una lettura più approfondita del danno osservato mantenendo però lo strumento tabellare, schematizzato e di più facile intuizione. Da tale ragionamento, ne deriva la necessità di saper distinguere e riconoscere una maggiore varietà di tipologie di danno, attingendo in egual misura dall'archivio di carta, rappresentato dal Modello, e dall'"*archivio di pietra*"⁴, tanto prezioso, la cui attenta osservazione consente di rilevare i danni, risalire alle cause che li hanno determinati e ipotizzare, quindi, possibili interventi risolutivi.

La ricerca qui condotta affronta questo tema, di spiccata attualità nel panorama del dibattito architettonico italiano e non solo: risalire, tramite lo studio delle antiche teorie e tecniche costruttive e l'osservazione diretta del danno, a meccanismi che possano essere classificati e catalogati in modo da

4 A. Giuffrè, *Valutazione della vulnerabilità sismica dei monumenti: metodi verifica e tecniche di intervento*, Studi e Ricerche sulla Sicurezza Sismica dei Monumenti, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", 1986 in C. Tocci, *Il rapporto tra meccanica... op. cit.*, p. 51.

individuare categorie ricorrenti. Per l'edilizia religiosa aquilana, colpita dal terremoto del 2009, assunta qui come caso studio, sono state identificate quattro differenti tipologie di meccanismo, che trovano riscontro nei modelli teorici. Un possibile sviluppo della ricerca potrebbe dunque essere finalizzato a fornire una dettagliata casistica di meccanismi di danno attivabili nei sistemi voltati, distinguendoli per tipologie geometriche e le tecniche costruttive; in questo modo, oltre che consentire una più completa comprensione del comportamento sismico delle strutture voltate, la ricerca potrebbe prestarsi a costituire un utile supporto per chi è chiamato a intervenire sul patrimonio danneggiato per restaurarlo e restituirlo all'uso: indirizzando la fase di conoscenza e, per questa via, orientando stringentemente il campo delle possibili soluzioni progettuali.

Per concludere, penso sia doveroso per tutti coloro che si accingono a trattare temi inerenti gli eventi sismici ricordare le tragiche conseguenze sociali e culturali subite dai territori colpiti, le 309 vittime, i 1500 feriti e i 70 mila sfollati, il dolore e la frustrazione di dover abbandonare i propri luoghi e la propria vita, costretti da un evento funesto la quale gestione, a distanza di ormai quasi 15 anni, lascia ancora tragicamente incompleta l'opera di ricostruzione di una città in cui, ancora oggi, il tempo sembra essere rimasto sospeso.

Bibliografia

Capitolo 1

A. Becchi, F. Foce, *Degli archi e delle volte, arte del costruire tra meccanica e stereotomia*, Marsilio, Venezia, 2002.

E. Benvenuto, *La scienza delle costruzioni e il suo sviluppo storico*, Edizioni di Storia e Letteratura, Roma, 2008.

G. A. Breyman, *Archi, volte, cupole*, in G. A. Breyman, *Trattato di costruzioni civili*, 1885, Riproduzione facsimile, Editrice Librerie Dedalo, Roma, 2003.

G. Cangì, *Manuale del consolidamento e restauro: archi e volte*, DEI Tipografia del Genio Civile, Roma, 2023.

L. Moro (a cura di), *Giovanni Carbonara. Introduzione alle Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale*, a cura di Laura Moro, Gangemi, Roma, 2006.

C. Carocci, C. Tocci (a cura di), *Antonino Giuffrè. Leggendo il libro delle antiche architetture. Aspetti statici del restauro, saggi 1985-1997*, Gangemi, Roma, 2010.

D. Capecchi, C. Tocci, *Le perizie sulla cupola vaticana di Le Seur, Jacquier e Boscovich*, «Palladio», 47, 2011, pp. 43-58.

D. Capecchi (a cura di), *Perizie di Statica*, «Edizione Nazionale delle Opere e delle Corrispondenze di Ruggiero Giuseppe Boscovich», Volume IX/II, Opere scientifiche Meccanica (statica e dinamica), Roma-Milano, 2010.

C. Carocci, C. Tocci, *Ricostruzione della lanterna di S. Mattia ai Crociferi a Palermo*, IX Convegno ANIDIS, *L'ingegneria sismica in Italia*, Torino, 1999.

M. Como, *Statica delle costruzioni storiche in muratura. Archi, volte, cupole, architetture monumentali, edifici sotto carichi verticali e sotto sisma*, II Edizione aggiornata, Aracne Editrice, Roma, 2015.

M. Como, I. Iori, F. Ottoni, *Scientia abscondita. Arte e scienza del costruire nelle architetture del passato*, Marsilio Editore, Venezia, 2019.

S. Di Pasquale, *L'arte del costruire tra conoscenza e scienza*, Marsilio, Venezia, 1996.

S. Di Pasquale, *Architettura e Terremoti*, prefazione in A. Guidotti, *Questioni di dinamica per il restauro dei monumenti*, Quaderni di restauro dei monumenti e di urbanistica dei centri antichi, «Edizioni Scientifiche Italiane», 11, 59-60-61, 1982, pp.5-34.

A. Giuffrè, *Monumenti e terremoti. Aspetti statici del restauro*, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Scuola di Specializzazione per lo studio ed il restauro dei monumenti, Multigrafica, Roma, 1988.

A. Giuffrè, *La meccanica nell'architettura, La statica*, La Nuova Italia Scientifica, Roma, 1986.

A. Giuffrè, *Appunti dalle lezioni di scienza delle costruzioni, La teoria dell'elasticità*, Facoltà di Architettura dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica,

Roma 1990.

A. Giuffrè, *Lecture sulla meccanica delle murature storiche*, Edizioni Kappa, Roma, 1991.

A. Giuffrè, *Sicurezza e Conservazione dei centri storici. Il caso di Ortigia*, Laterza, Bari-Roma, 1993.

A. Giuffrè, C. Carocci, *Codice di pratica per la sicurezza e la conservazione del centro storico di Palermo*, Laterza, Roma-Bari, 1999.

J. Heyman, *The safety of masonry arches*, Pergamon Press, 1969.

J. Heyman, "Gothic" Construction in Ancient Greece, «Journal of the Society of Architectural Historians», 31, 1, 1972, pp. 3-9.

J. Heyman, *The science of Structural Engineering*, Imperial College Press, Londra, 1999.

J. Heyman, *Il saggio di Coulomb sulla statica. Un contributo alla storia dell'Ingegneria Civile*, «Fonti», collana diretta da A. De Simone, G. Viaggiani, Hevelius, Benevento, 1999.

J. Heyman, *Lo scheletro di pietra. Ingegneria strutturale dell'architettura in muratura*, EPC, Roma, 2014.

S. Huerta, *Mechanics of masonry vaults: the equilibrium approach*, in P. B. Lourenço, P. Roca (a cura di), *Historical Constructions. Possibilities of numerical and experimental techniques*, Universidade do Minho, Guimarães, Portogallo, 2001.

S. Huerta, *Arcos, bovedas y cupulas. Geometria y equilibrio en el calculo tradicional de estructuras de fabrica*, Instituto Juan de Herrera, Escuela Tecnica Superior de Arquitectura, Madrid, 2004.

F. Ottoni, G. Benvenuto, M. Como, *Delle cupole e del loro tranello. La lunga vicenda delle fabbriche cupolate tra dibattito e sperimentazione*, Aracne, Roma, 2012.

I. Tarrío, *Gothic Structural Theories ca. 1930: the Contribution of Victor Sabouret*, «Advanced Materials Research», 133-134, 2010, pp. 137-142.

E. Tomasoni, *Le volte in muratura negli edifici storici. Tecniche costruttive e comportamento strutturale*, Aracne, Roma, 2008.

Capitolo 2

Sismologia

A. Arrighetti, *L'Archeosismologia in architettura. Per un manuale*, Firenze University Press, Firenze, 2015.

M. Baratta, *I terremoti in Italia*, Ristampa anastatica, «Katastrophé», collana diretta da L. Mercalli, Volumi I-II, Mimesis, Milano-Udine, 2020.

E. Faccioli, R. Paolucci, *Elementi di sismologia applicata all'ingegneria*, Pitagora, Bologna, 2005

F. Penta, *Alcuni provvedimenti presi dopo i grandi terremoti italiani dei secoli XVIII, XIX e XX*, «Geotecnica», 5, 1964, pp. 247-254.

A. Rovida, M. Locati, R. Camassi, B. Lolli, P. Gasperini, A. Antonucci, *Catalogo Parametrico dei Terremoti*

Italiani (CPTI15), versione 4.0., Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), 2022.

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://www.ingv.it/>, u.c. gennaio 2024.

F. Pezzella, *I terremoti del passato nei cataloghi storici e nelle banche dati, preziose fonti di informazioni*. <https://www.ingv.it/newsletter-ingv-n-8-ottobre-2021-anno-xv/i-terremoti-del-passato-nei-cataloghi-storici-e-nelle-banche-dati-preziose-fonti-di-informazioni>, u.c. ottobre 2023.

I terremoti in Italia. <https://ingvterremoti.com/i-terremoti-in-italia/>, u.c. ottobre 2023.

<https://ingvterremoti.com/la-pericolosita-sismica/>, u.c. ottobre 2023.

<https://ingvterremoti.com/glossario/>, u.c. gennaio 2024.

Angeluccio, Francesco d', voce Dizionario Biografico degli italiani Treccani, Volume 3 (1961). [https://www.treccani.it/enciclopedia/francesco-d-angeluccio_\(Dizionario-Biografico\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/francesco-d-angeluccio_(Dizionario-Biografico)/), u.c. gennaio 2024.

Baratta, Mario, voce Dizionario Biografico degli italiani Treccani, Volume 5 (1963). https://www.treccani.it/enciclopedia/mario-baratta_%28Dizionario-Biografico%29/, u.c. gennaio 2024.

Ligorio, Pirro, voce Dizionario bibliografico degli italiani, Volume 65 (2005). [https://www.treccani.it/enciclopedia/pirro-ligorio_\(Dizionario-Biografico\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/pirro-ligorio_(Dizionario-Biografico)/), u.c. gennaio 2024.

Vivenzio, Giovanni, voce Dizionario Biografico degli italiani, Volume 100 (2020). [https://www.treccani.it/enciclopedia/giovanni-vivenzio_\(Dizionario-Biografico\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/giovanni-vivenzio_(Dizionario-Biografico)/), u.c. gennaio 2024.

Portogallo, voce Enciclopedia Italiana Treccani, IV Appendice (1981), [https://www.treccani.it/enciclopedia/portogallo_res-d2b3551b-87e9-11dc-8e9d-0016357eee51_\(Enciclopedia-Italiana\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/portogallo_res-d2b3551b-87e9-11dc-8e9d-0016357eee51_(Enciclopedia-Italiana)/), u.c. gennaio 2024.

Resilienza, voce Enciclopedia on line Treccani. <https://www.treccani.it/enciclopedia/resilienza/>, u.c. ottobre 2023.

Sviluppi storici e costruttivi della città de L'Aquila

O. Antonini, *Chiese dell'Aquila: architettura religiosa e struttura urbana*, Carsa, Pescara, 2004

A. Aloisio, *The Timber-Framed (TF), Masonries in L'Aquila: The baraccato Aquilano*, «Heritage», 30, 18, 2020.

A. Aloisio, M. Fragiaco, G. D'alò, *Traditional T-F Masonries in the City Centre of L'Aquila - The Baraccato Aquilano*, «International Journal of Architectural Heritage», 15, 3, 2021, pp. 437-454.

C. Bartolomucci, *Gli effetti del terremoto del 1915 nella città di Aquila: i danni e gli orientamenti per il restauro*, in S. Ciranna, P. Montuori, *Avezzano, la Marsica e il circondario a cento anni dal sisma del 1915. Città e territori tra cancellazione e reinvenzione*, Ufficio Stampa del Consiglio Regionale dell'Abruzzo, 2015, pp. 151-161.

C. Bartolomucci, *La dialettica tra eresie e ortodossie nei restauri in Abruzzo, dagli anni Sessanta all'attuale 'ricostruzione' post sismica*, collana «Scienza e Beni culturali», Giornate di studi Bressanone 2016, *Eresia ed ortodossia nel restauro. Progetti e realizzazioni*, Arcadia Ricerche, pp. 151-233.

S. Brusaporci, *Il disegno dell'apparecchio aquilano nell'architettura religiosa dal XII al XIV secolo*, in R.

- M. Strollo (a cura di), *Disegno e conoscenza: contributi per la storia e l'architettura*, Aracne, Roma, 2006, pp. 75-92.
- G. Cangì, *Murature tradizionali e terremoto*, Atti del convegno *Restaurare dopo terremoto*, ARCo – Associazione per il Recupero del Costruito, 2009.
- C. Carocci, S. Lagomarsino, *Gli edifici in muratura nei centri storici dell'Aquilano*, «Progettazione sismica», 3, 2009, pp. 117-131.
- C. Carocci, S. Cattari, C. Circo, D. Indelicato, C. Tocci, *A Methodology for Approaching the Reconstruction of Historical Centres Heavily Damaged by 2009 L'Aquila Earthquake*, «Advanced Materials Research», 133-134, 2010, pp. 1113-1118.
- C. Carocci, *Small centres damaged by 2009 L'Aquila earthquake: on site analyses of historical masonry aggregates*, «Bulletin of Earthquake Engineering», 10, 2012, pp. 45-71.
- C. Carocci, C. Tocci, *Le tecniche costruttive nella ricostruzione post 1703*, «Quaderni dell'Istituto di Storia dell'Architettura», 73-74, D. Esposito, V. Montanari (a cura di), *Realtà dell'architettura fra materia e immagine. Per Giovanni Carbonara: studi e ricerche*, Volume II, L'Erma di Bretschneider, Roma, 2021, pp. 29-34.
- C. Carocci, V. Macca, C. Tocci, *The roots of the 18th century turning point in earthquake-resistant building*, in J. Mascarenhas-Mateus, A. P. Pires (a cura di), *History of Construction Cultures*, Volume 2, CRC Press Balkema, Lisbona, 202, pp. 623-630.
- S. Cecamore, *La ricostruzione aquilana, antichi e nuovi presidi*, «ArcHistoR», II, 4, 2015, pp. 119-151.
- S. Cecamore, *La costruzione in pietra. Analisi delle principali tipologie murarie dell'Aquila tra XII e XVII secolo*, in Actas del Noveno Congreso de Historia de la Construcción, Volume 1, 2015, pp. 387-396.
- M. Centofanti, R. Colapietra, C. Conforti, P. Properzi, L. Zordan, *L'Aquila città di piazze. Spazi urbani e tecniche costruttive*, Carsa, Pescara, 1992.
- A. Clementi, E. Piroddi, *L'Aquila*, «Le città nella storia d'Italia», collana diretta da C. De Seta, Laterza, Roma-Bari, 1986.
- D. del Pesco, *Il barocco aquilano e i terremoti*, in C. Conforti, in V. Gusella (a cura di), *AID MONUMENTS. Conoscere progettare ricostruire*, Volume I, Aracne, Roma, 2013, pp. 85-103.
- D. Fiorani, *Il perenne ciclo del divenire nel cantiere storico aquilano. Annotazioni su tessuto urbano architetture e costruzione nella città dei terremoti*, «Città e storia», VI, Università degli Studi Roma Tre – CROMA, 2011, pp. 239-260.
- A. Giannantoni, *Consolidamento delle strutture murarie: analisi critica sull'efficacia dei rinforzi statici in Italia centrale tra fine del XIX e inizio del XX secolo*, Tesi di Dottorato di Ricerca, Facoltà di Architettura, La Sapienza, Relatrice: D. Fiorani, a.a. 2021-2022.
- E. Guidoboni (a cura di), *Pirro Ligorio. Libro di diversi terremoti*, «Edizione Nazionale delle Opere di Pirro Ligorio», Libri delle Antichità, Torino, Volume 28, De Luca Editori d'Arte, Roma, 2005.
- E. Guidoboni (a cura di), *I terremoti prima del Mille in Italia e nell'area mediterranea*, Storia, Archeologia, Sismologia, SGA Storia-Geofisica-Ambiente, Bologna, 1989.

E. Guidoboni, G. Ferrari, *Historical cities and earthquakes: Florence during the last nine centuries and evaluations of seismic hazard*, «Annali di Geofisica», XXXVIII, 5-6, 1995, pp. 617-647.

E. Guidoboni, S. Santoro Bianchi, *Collapses and seismic collapses in archaeology: proposal for a thematic atlas*, «Annali di Geofisica», XXXVIII, 5-6, 1995, pp. 1013-1017.

E. Guidoboni, G. Ferrari, *The effects of earthquakes in historical cities: the peculiarity of the Italian case*, «Annali di Geofisica», XLIII, 4, 2000, pp. 667-686.

A. Marino (a cura di), *Presidi antisismici nell'architettura storica e monumentale*, Atti della I Giornata di Studio promossa dalla Soprintendenza B.A.A.S per l'Abruzzo e dal Dipartimento di Architettura e Urbanistica dell'Università dell'Aquila, Gangemi, Roma, 2000.

R. Masiani, C. Tocci, *Seismic History of the Church of San Pietro di Coppito in L'Aquila*, «International Journal of Architectural Heritage», 9, 7, 2015, pp. 811-833.

A. G. Pezzi, *Tecniche e materiali tradizionali nei cantieri di restauro abruzzesi*, in G. Fiengo, L. Guerriero (a cura di), *Atlante delle tecniche costruttive tradizionali. Lo stato dell'arte, i protocolli della ricerca. L'indagine documentaria*, Atti del I e del II Seminario Nazionale, pp. 180-185.

E. Piccoli, C. Tocci, *A prova di bomba. Ingegneri, architetti e teorie sulle volte in un cantiere militare di metà Settecento*, «ArcHistoR», VI, 12, 2019, pp. 213-251.

E. Piccoli, M. Volpiano, V. Burgassi (a cura di), *Quaderni di Storia della Costruzione, Vol. 1. Storia della costruzione: percorsi politecnici*, collana del Centro di Ricerca Construction History Group, Dipartimento di Architettura e Design, Politecnico di Torino, 2021.

N. Ruggieri, *Il sistema antisismico borbonico muratura con intelaiatura lignea. Genesi e sviluppo in Calabria alla fine del '700*, «Bollettino Ingegneri», 10, 2013, p. 5.

S. Stellacci, N. Ruggieri, V. Rato, *Gaiola vs Borbone system: a comparison between 18th Century anti-seismic case studies*, «International Journal of Architectural Heritage», 10, 6, 2016, pp. 817-828.

S. Tobriner, *La Casa baraccata: Earthquake-Resistant Construction in 18th-Century Calabria*, «Journal of the Society of Architectural Historians», 42, 2, 1983, pp. 131-138.

A. Tosone, A. Bellicoso, *Anti-seismic presidia in the historical building of L'Aquila: the role of the wooden elements*, «International Journal of Architectural Heritage», 2, 1, 2018, pp. 48-59.

C. Varagnoli, *Lo stato dell'arte in Abruzzo*, in G. Fiengo, L. Guerriero (a cura di), *Atlante delle tecniche costruttive tradizionali. Lo stato dell'arte, i protocolli della ricerca. L'indagine documentaria*, Atti del I e del II Seminario Nazionale, pp. 54-66.

C. Varagnoli, *Architetture senza nomi: metodi e obiettivi nello studio delle tecniche costruttive*, in C. Varagnoli (a cura di), *Muri parlanti. Prospettive per l'analisi e la conservazione dell'edilizia storica*, Atti del Convegno di Pescara 2008, Alinea, Firenze, 2009, pp. 15-26.

Capitolo 3

Archivio Sintecna s.r.l., *Progetto di restauro della chiesa di San Biagio Amiterno nel centro storico dell'Aquila*, 2012.

Archivio Sintecna s.r.l., *Complesso monumentale di Santa Maria di Roio. Progetto definitivo*, 2013.

Archivio Sintecna s.r.l., *Progetto "Ripartire da Collemaggio"*, 2014.

O. Al Shawi, L. D. Decanini, D. Liberatore, L. Liberatore, E. Raglione, L. Sorrentino, *Analisi dei danni causati dal terremoto del 6 aprile 2009 al patrimonio culturale. Chiesa di San Giuseppe dei Minimi*, Vice-Commissariato Straordinario per i Beni Culturali Danneggiati dal Terremoto del 6 Aprile 2009, Università degli studi di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, 2009.

V. Alecci, S. B. Bati, M. Fagone, M. Gemma Maggi, T. Rotunno, M. Tupputi, *Relazione. La Chiesa di Santa Maria del Soccorso a L'Aquila*, Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Costruzioni.

A. Aloisio, E. Antonacci, M. Fragiaco, R. Alaggio, *The recorded seismic response of the Santa Maria di Collemaggio basilica to low-intensity earthquake*, «International Journal of Architectural Heritage», 15, 1, 2021, pp. 229-247.

A. Aloisio, R. Cirella, E. Antonacci, R. Alaggio, *Hypothesis on the decrement of the first natural frequencies of the Santa Maria di Collemaggio basilica from three years monitoring: the role of the CLT roof*, «International Journal of Architectural Heritage», 17, 6, 2023, pp. 955-969.

S. Amoroso, I. Gaudiosi, M. Tallini, G. Di Giulio, G. Milana, *2D site response analysis of a cultural heritage. The case study of the site of Santa Maria di Collemaggio Basilica (L'Aquila, Italy)*, «Bulletin of Earthquake Engineering», 16, 2018, pp. 4443-4466.

M. Andreini, A. De Falco, M. Sassu, *Damage mechanisms as seismic transducers in historic centres: the example of San Pio delle Camere after 2009 earthquake in Abruzzo*, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbona, 2012.

E. Antonacci, F. Benedettini, F. Di Fabio, A. Di Egidio, F. Fusco, V. Gattulli, A. Martinelli, F. Vestroni, *Basilica di S. Maria di Collemaggio in L'Aquila. Studi e ricerche dell'Università*, Unità Operativa di Ingegneria Sismica (UOIS), Università dell'Aquila, Facoltà di Ingegneria, 2009.

N. Augenti, A. Borri, *CASO DI STUDIO: Chiesa di Santa Maria di Paganica nel centro storico della Città de L'Aquila*, Università di Napoli Federico II, Università di Perugia, 2009.

C. Bartolomucci, *Santa Maria di Collemaggio. Interpretazione critica e problemi di conservazione*, «Facoltà di Architettura Valle Giulia», collana curata da M. P. Arredi, T. Ferrante, Palombi, Roma, 2004.

C. Bartolomucci, I. Trizio, *Dal rilievo del danno sismico al disegno per il progetto di restauro: un'applicazione di documentazione speditiva in condizioni di emergenza*, «DisegnareCon», 8, 14, 2015.

F. Bergamaschi, G. Cultrera, L. Luzi, R. M. Azzara, G. Ameri, P. Augliera, P. Bordoni, F. Cara, R. Cogliano, E. D'Alema, D. Di Giacomo, G. Di Giulio, A. Fodarella, G. Franceschina, F. Galadini, M. R. Gallipoli, S. Gori, P. Harabaglia, C. Ladina, S. Lovati, S. Marzorati, M. Massa, G. Milana, M. Mucciarelli, F. Pacor, S. Parolai, M. Picozzi, M. Pilz, S. Pucillo, R. Puglia, G. Riccio, M. Sobesiak, *Evaluation of site effect in the Aterno river valley (Central Italy) from aftershocks of the 2009 L'Aquila earthquake*, «Bulletin of Earthquake Engineering», 9, 2011, pp. 697-715.

E. Bianchi, A. Brignola, E. Curti, S. Lugano, S. Parodi, S. Podestà, *Prime considerazioni sul comportamento sismico della chiesa di Immacolata Concezione a L'Aquila (Frazione di Paganica) (Tra gestione dell'emergenza e prevenzione)*, Università di Genova, Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni, dell'Am-

biente e del Territorio, 2009.

L. Binda, P. Condoleo, J. Magi, B. Silva, M. R. Valluzzi, *Chiesa di San Marco – L'Aquila*, Politecnico di Milano – Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Costruzioni e Trasporti, 2009.

L. Binda, C. Chesi, M. A. Parisi, *Seismic damage to churches: Observations from the L'Aquila, Italy, Earthquake and considerations on a case-study*, «Advances Materials Research», 133-134, 2010, pp. 641-646.

E. Booth, *Dealing with earthquakes: the practice of seismic engineering 'as if people mattered'*, «Bulletin of Earthquake Engineering», 16, 2018, pp. 1661-1724.

G. Brandonisio, G. Lucibello, E. Mele, A. De Luca, *Damage and performance evaluation of masonry churches in the 2009 L'Aquila earthquake*, «Engineering Failure Analysis», 34, 2013, pp. 693-714.

A. Borri, G. Cangi, M. Caraboni, A. Giancarlo, F. Menghini, L. Procacci, R. Vetturini, *Sisma del 6 Aprile 2009 in Abruzzo e BBCC: il caso della Chiesa di S. Silvestro a L'Aquila*, «Bollettino ingegneri», 4, 2010.

G. Boscato, M. Pizzolato, S. Russo, A. Tralli, *Sulla risposta sismica della chiesa di S. Pietro di Coppito a L'Aquila al sisma del 6 aprile 2009*, XIV Convegno ANIDIS, *L'ingegneria sismica in Italia*, Bari, 2011.

G. Boscato, M. Pizzolato, S. Russo, A. Tralli, *Seismic behavior of a complex historical church in L'Aquila*, «International Journal of Architectural Heritage», 8, 2014, pp. 718-757.

G. Brandonisio, G. Lucibello, E. Mele, A. De Luca, *Damage and performance evaluation of masonry churches in the 2009 L'Aquila earthquake*, «Engineering Failure Analysis», 34, 2013, pp. 693-714.

A. Brignola, S. Cattari, E. Curti, S. Parodi, S. Podestà, *Prime considerazioni sul comportamento sismico della Chiesa di Santi Marciiano e Nicando a L'Aquila (tra gestione dell'emergenza e prevenzione)*, Università di Genova, Dipartimento di Ingegneria delle Costruzioni, dell'Ambiente e del Territorio, 2009.

G. Cacciaguerra, M. Piazza, M. P. Gatti, R. Tomasi, D. Zonta, *La chiesa di S. Margherita dei padri gesuiti a L'Aquila*, Università degli Studi di Trento, Facoltà di Ingegneria, 2009.

C. Calderini, S. Lagomarsino, *The behaviour of S. Agostino church during 6th April 2009 Earthquake in L'Aquila. Vulnerability and damage assessment*, «Advanced Materials Research», 133-134, 2010, pp. 771-776.

C. Calderini, S. Lagomarsino, *Chiesa di Sant'Agostino. Note storiche e costruttive. Lettura del danno e della vulnerabilità. Considerazioni sul restauro e la ricostruzione*, Università degli Studi di Genova Dipartimento di Ingegneria delle, Costruzioni dell'Ambiente e del Territorio, 2009.

R. Camassi, P. Galli, A. Tertulliani, S. Castenetto, A. Lucantoni, D. Molin, G. Naso, E. Peronace, F. Bernardini, V. Castelli, A. Cavaliere, E. Ercolani, S. Salimbeni, D. Tripone, G. Vannucci, L. Arcoraci, M. Berardi, C. Castellano, S. Del Mese, L. Graziani, I. Leschiutta, A. Maramai, A. Massucci, A. Rossi, M. Vecchi, R. Azzaro, S. D'Amico, F. Ferrari, N. Mostaccio, R. Platania, L. Scarfi, T. Tuvé, L. Zuccarello, S. Carlino, A. Marturano, P. Albini, A. Gomez Capera, M. Locati, F. Meroni, V. Pessina, C. Piccarreda, A. Rovida, M. Stucchi, G. Buffarini, S. Paolini, V. Verrubbi, M. Mucciarelli, R. Gallipoli, M.S. Barbano, I. Cecic, M. Godec, *L'indagine macrosismica: metodologia, parametri del terremoto, questioni aperte*, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), 2009.

C. Carocci, C. Tocci, *Rapporto preliminare sulle chiese di San Demetrio Martire, Santa Maria dei Racco-*

mandati, San Giovanni (Comune di San Demetrio ne' Vestini). Note Costruttive. Lettura e interpretazione del danno. Considerazioni sugli interventi di restauro strutturale, Università di Catania, Dipartimento ASTRA, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica.

C. Carocci, S. Cattari, C. Circo, S. Lagomarsino, C. Tocci, *The case study of Santa Maria Paganica church damaged by L'Aquila earthquake*, «Advanced Materials Research», 133-134, 2010, pp. 163-168, 2009.

C. Carocci, S. Cattari, S. Lagomarsino, C. Tocci, *Chiesa di Santa Maria Paganica (L'Aquila). Note storiche e costruttive. Lettura del danno e della vulnerabilità. Considerazioni sul restauro e la ricostruzione*, Università di Catania, Università degli Studi di Genova, Università degli Studi di Roma, 2009.

C. Carocci, S. Cattari, C. Circo, S. Lagomarsino, C. Tocci, *The case study of Santa Maria Paganica church damaged by L'Aquila earthquake*, «Advanced Materials Research», 133-134, 2010, pp. 163-168.

M. Carraro, T. Ghedina, A. De Sabbata, C. Modena, F. Casarin, M. Dalla Benetta, *The S. Marco Church in L'Aquila: provisional Interventions after the 2009 Abruzzo Earthquake*, «Advanced Materials Research», 133-134, 2010, pp. 953-958.

C. Casapulla, C. Anselmi, C. Cristilli, E. De Rosa, F. Galizia, M. Gargiulo, F. Lauro, A. Maione, A. Pizzi, *Sisma Abruzzo 2009. Valutazione, danni e vulnerabilità della Chiesa di Santa Maria del Carmine - L'Aquila*, Università degli Studi di Napoli Federico II, Dipartimento di Costruzioni e Metodi Matematici in Architettura, 2009.

S. Cattari, M. Angiolilli, *Multiscale procedure to assign structural damage levels in masonry buildings from observed or numerically simulated seismic performance*, «Bulletin of Earthquake Engineering», 20, 2022, pp. 7561-7607.

C. Cennamo, C. Cusano, *Consolidation with reinforced concrete for the ecclesiastical architecture in L'Aquila (Italy): observations after the earthquake*, XIII International Forum, *Heritage and Technology*, 2015.

V. Ceradini (a cura di), *Caso di studio Chiesa di Sant'Eusanio, a Sant'Eusanio Forconese danneggiata dal sisma del 6 aprile 2009*, Università Mediterranea di Reggio Calabria, Dipartimento PAU, Corso di laurea in Storia e Conservazione dei Beni Architettonici e Ambientali.

CNR-ITC, *Casi studio: Chiesa di Sant'Eusanio Farconese*, CNR, 2009.

CNR-ITC, *Casi studio: Chiesa di San Felice Martire a Poggio Pienze*, CNR, 2009.

CNR-ITC, *Casi studio: Chiesa di San Filippo Neri a L'Aquila*, CNR, 2009.

CNR-ITC, *Casi studio: Chiesa di San Paolo ad Pletuinum a Prata D'Ansidonia*, CNR, 2009.

E. Cosenza, C. Del Vecchio, M. Di Ludovico, M. Dolce, C. Moroni, A. Prota, E. Renzi, *The Italian guidelines for seismic risk classification of constructions: technical principles and validation*, «Bulletin of Earthquake Engineering», 16, 2018, pp. 5905-5935.

C. Q. M. Costa, *Seismic vulnerability of historical structures. Damage state of the Abruzzo churches, in the sequence of the 2009 earthquake*, Master's Thesis, Erasmus Mundus Advanced Master in Structural Analysis of Monuments and Historical Constructions, Università di Padova, 2009.

G. Cultrera, M. Mucciarelli, S. Parolai, *The L'Aquila earthquake - A view of site effects and building behavior from temporary network*, «Bulletin of Earthquake Engineering», 9, 2011, pp. 691-695.

- D. D'Ayala, M. Dolce, *Guest editorial: L'Aquila earthquake: seismic sequence of 6th April 2009, Abruzzo, Italy*, «Bulletin of Earthquake Engineering», 9, 2011, pp. 1-10.
- D. D'Ayala, S. Paganoni, *Assessment and analysis of damage in L'Aquila historic city centre after 6th April 2009*, «Bulletin of Earthquake Engineering», 9, 2011, pp. 81-104.
- F. da Porto, B. Silva, C. Costa, C. Modena, *Macro-Scale Analysis of Damage to Churches after Earthquake in Abruzzo (Italy) on April 6, 2009*, «Journal of Earthquake Engineering», 16, 2012, pp. 739-758.
- F. De Cesaris, D. Fiorani, G. de Felice, A. Donatelli, A. Placidi, A. Mauro, *Chiesa di S. Maria ad Cryptas a Fossa (L'Aquila)*, Università degli Studi La Sapienza, Scuola di Specializzazione in Beni Architettonici e del Paesaggio, Università degli Studi Roma Tre, Dipartimento di Strutture, 2009.
- G. De Matteis, E. Criber, G. Brando, *Damage Probability Matrices for Three-Nave Masonry Churches in Abruzzi After the 2009 L'Aquila Earthquake*, «International Journal of Architectural Heritage», 10, 2-3, 2016, pp. 120-145.
- G. De Matteis, G. Brando, V. Corlito, *Predictive model for seismic vulnerability assessment of churches based on the 2009 L'Aquila earthquake*, «Bulletin of Earthquake Engineering», 17, 2019, pp. 4909-4936.
- L. D. Decanini, D. Liberatore, L. Liberatore, E. Raglione, L. Sorrentino, *Chiesa di San Biagio d'Amiternum. Analisi dei danni causati dal terremoto del 6 aprile 2009 al patrimonio culturale*, Vice-Commissariato Straordinario per i Beni Culturali Danneggiati dal Terremoto del 6 Aprile 2009, Università degli studi di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, 2009.
- A. Di Tommaso, *Post-sisma aquilano: analisi di crolli, di interventi provvisionali e prospettive tecniche di ricostruzione*, Università Alma Mater di Bologna, 2009.
- L. Diana, G. Vaiano, A. Formisano, L. Scandolo, S. Podestà, P. Lestuzzi, *The Seismic Vulnerability Assessment of Heritage Buildings: a Holistic Methodology for Masonry Churches*, «International Journal of Architectural Heritage», 29, 1, 2023.
- M. Dolce, A. Goretti, *Building damage assessment after the 2009 Abruzzi earthquake*, «Bulletin of Earthquake Engineering», 13, 2015, pp. 2241-2264.
- Y. Endo, L. Pelà, P. Roca, F. da Porto, C. Modena, *Comparison of seismic analysis methods applied to a historical church struck by 2009 L'Aquila earthquake*, «Bulletin of Earthquake Engineering», 13, 2015, pp. 3749-3778.
- A. Franchi, P. Napoli, P. Crespi, N. Giordano, M. Zucca, *Unloading and reloading process for the earthquake damage repair of ancient masonry columns. The case of the basilica di Collemaggio*, «International Journal of Architectural Heritage», 16, 11, 2022, pp. 1683-1698.
- C. Galli, *Precedenti storici e orientamenti della normativa sismica dei beni culturali. Regole dell'arte, intuizione e calcolo numerico*, XV Convegno ANIDIS, *L'ingegneria sismica in Italia*, Padova, 2013.
- P. Galli, R. Camassi, *Rapporto sugli effetti del terremoto aquilano del 6 aprile 2009*, Rapporto congiunto DPC-INGV, 2009.
- E. Giuriani, *Relazione Santa Maria degli Angeli fuori Porta Napoli*, Università degli Studi di Brescia, Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio e Ambiente, 2009.

- M. Indirli, L. A. S. Kouris, A. Formisano, R. P. Borg, F. M. Mazzolani, *Seismic damage assessment of unreinforced masonry structures after the Abruzzo 2009 earthquake: the case study of the historical centers of L'Aquila and Castelvechio Subequo*, «International Journal of Architectural Heritage», 7, 2013, pp. 536-578.
- S. Lagomarsino, *Damage assessment of churches after L'Aquila earthquake (2009)*, «Bulletin of Earthquake Engineering», 10, 2012, pp. 73-92.
- S. Lagomarsino, *Seismic assessment of rocking masonry structures*, «Bulletin of Earthquake Engineering», 13, 2015, pp. 97-128.
- G. Lucibello, G. Brandonisio, E. Mele, A. De Luca, *Comportamento sismico di edifici monumentali a pianta basilicale in seguito al sisma Abruzzo'09: Quattro casi di studio*, XIV Convegno ANIDIS, *L'ingegneria sismica in Italia*, Bari, 2011.
- G. Lucibello, G. Brandonisio, E. Mele, A. De Luca, *Seismic behavior of some basilica churches after L'Aquila 2009 earthquake*, «Advanced Materials Research», 133-134, 2010, pp. 801-806.
- C. Marcotulli, *L'analisi stratigrafica muraria e il terremoto: storia sismica degli edifici del "quarto" di S. Giovanni nella città dell'Aquila (XIV-XVIII secolo)*, VI Congresso Nazionale di Archeologia Medievale, L'Aquila, 2012.
- A. Martinelli, A. Mannella, C. Mancini, L. Milano, D. Petracca, N. Cherubini, *Sisma Abruzzo 6 aprile 2009. La gestione dell'attività di rilievo del danno degli edifici ordinari*, 2009, pp. 48-53.
- R. Masiani, C. Tocci, *Seismic History of the Church of San Pietro di Coppito in L'Aquila*, «International Journal of Architectural Heritage», 9, 2015, pp. 811-833.
- C. Meletti, M. Stucchi, *Pericolosità sismica, normativa e zone sismiche nell'Aquilano*, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), 2009.
- MIBAC, *Sisma in Abruzzo: il recupero dei monumenti*, XIII Salone dei Beni e delle Attività Culturali, Restaura, V Salone del Restauro e dei Beni Culturali, Venezia, 2009.
- C. Modena, F. da Porto, G. Bettiol, M. Giaretton, *Edilizia storia monumentale - Salvaguardia degli edifici di interesse storico-artistico nell'emergenza post-sisma*, «Progettazione sismica», 2009, pp. 211-221.
- C. Modena, F. da Porto, F. Casarin, M. Munari, E. Simonato, *Cultural Heritage Buildings and the Abruzzo Earthquake: Performance and Post-Earthquake Actions*, «Advanced Materials Research», 133-134, 2010, pp. 3-17.
- C. Modena, M. R. Valluzzi, F. da Porto, F. Casarin, *Structural aspects of the conservation of historic masonry constructions in seismic areas: remedial measures and emergency actions*, «International Journal of Architectural Heritage», 5, 4, 2011, pp. 539-558.
- P. Napoli, *Strutture provvisoriale in acciaio per l'intervento di riabilitazione delle colonne della basilica di Collemaggio a L'Aquila*, «Costruzioni Metalliche», LXIX, 1, 2017, pp. 27-37.
- G. Oliveto, L. Liberatore, L. D. Decanini, *Evoluzione storica della normativa sismica italiana alla luce degli effetti causati dal terremoto dell'Aquila del 2009*, XIV Convegno ANIDIS, *L'ingegneria sismica in Italia*, Bari, 2011.

- M. Pavlovic, E. Reccia, A. Cecchi, *A procedure to investigate the collapse behavior of masonry domes: some meaningful cases*, «International Journal of Architectural Heritage», 10, 1, 2016, pp. 67-83.
- P. Riva, G. Mirabella Roberti, *Chiesa di Santa Maria degli Angeli, località Bagno, L'Aquila. Relazione sul sopralluogo*, Università degli Studi di Bergamo, Dipartimento di Progettazione e Tecnologie, 2009.
- S. Russo, A. Adami, I. Aldreggetti, A. Barbieri, G. Boscato, D. Bufo, M. Celebrin, C. Colla, A. Danese, A. Di Tommaso, P. Faccio, F. Guerra, L. Massaria, M. Silvestri, A. Sperduti, P. Venier, *Caso studio: complesso monumentale della Chiesa di San Pietro di Coppito all'Aquila*, Emergenza Abruzzo 2009, Università Iuav di Venezia, 2009.
- B. Pace, D. Alberello, P. Boncio, M. Dolce, P. Galli, P. Messina, L. Peruzza, F. Sabetta, T. Sanò, F. Visini, *Predicted ground motion after L'Aquila 2009 earthquake (Italy, Mw 6.3): input spectra for seismic microzoning*, «Bulletin of Earthquake Engineering», 9, 2011, pp. 199-230.
- S. Papa, G. Di Pasquale, *Manuale per la compilazione della scheda per il rilievo del danno ai beni culturali, Chiese. MODELLO A-DC*, Presidenza del Consiglio dei Ministri, Dipartimento della Protezione Civile, 2011.
- A. M. Reggiani, *Il patrimonio ferito dell'Aquila*, «Revista del Seminario de Arqueología de la Universidad Pablo de Olavide de Sevilla», 10, 2011, pp. 307-342.
- S. Sfarra, A. Bendada, C. Ibarra-Castanedo, D. Ambrosini, D. Paoletti, X. Maldague, *Santa Maria di Collemaggio church (L'Aquila, Italy). Historical reconstruction by non destructive testing techniques*, «International Journal of Architectural Heritage», 9, 2015, pp. 367-390.
- B. Silva, C. Q. Costa, F. da Porto, M. R. Valluzzi, C. Modena, *Seismic Vulnerability of Historical Structures: Damage State of the Abruzzo (Italy) Churches in the Sequence of the April 2009 Earthquake*, «Advanced Materials Research», 133-134, 2010, pp. 765-770.
- R. Sisti, E. Cescatti, V. Follador, F. da Porto, C. Calderini, S. Lagomarsino, M. Morici, A. Prota, *Operational critical issues filling in the Italian form for the post-earthquake damage assessment of churches (A-DC 2006)*, XIX Convegno ANIDIS, *L'ingegneria sismica in Italia*, Torino, 2022.
- D. Spina, B. G. Lamonaca, M. Nicoletti, M. Dolce, *Structural monitoring by the Italian Department of Civil Protection and the case of 2009 Abruzzo seismic sequence*, «Bulletin of Earthquake Engineering», 9, 2011, pp. 325-346.
- A. Staniscia, E. Spacone, V. Fabietti, *Performance-Based Urban Planning: Framework and L'Aquila Historic City Center Case Study*, «International Journal of Architectural Heritage», 11, 5, 2017, pp. 656-669.
- S. Tringali, R. La Rosa, *San Biagio d'Amiternum. Intervento di ricostruzione e restauro*, L.C.T., Ispica, 2012.
- S. Tringali, R. La Rosa, E. Raglione, *Aggregato San Giuseppe Artigiano. L'Aquila, Intervento di ricostruzione e restauro*, L.C.T., Ispica, 2022.
- A. Vignoli, E. Del Monte, B. Ortolani, A. Borghini, *Chiesa di Santo Stefano, Castelnuovo (San Pio delle Camere). Analisi preliminare del comportamento strutturale a seguito dell'evento sismico del 06/04/2009*, Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, 2009.
- Le Chiese delle Diocesi Italiane, <https://chieseitaliane.chiesacattolica.it/chieseitaliane/index.jsp> u.c. gennaio 2024.

Ringrazio il professor Tocci, che con immensa disponibilità e cortesia mi ha seguito durante il lavoro di tesi, mostrando costante interesse ed entusiasmo, guidandomi assecondando i miei interessi, sempre disponibile al dialogo e al confronto, trasmettendomi tutta la sua passione.

Ringrazio la professoressa Bartolozzi e il professor Napoli, che, oltre a fornirmi preziosi materiali di analisi, mi hanno fatto appassionare per la prima volta ai temi del restauro e della tutela.

Ringrazio i miei genitori, che con la presenza, il costante supporto e l'infinito amore mi hanno sempre assecondata con pazienza, lasciandomi libera di coltivare le mie passioni, che ringrazio di avermi trasmesso, insegnandomi la dignità del lavoro, da rispettare con impegno e serietà, per dimensione etica.

Ringrazio le mie sorelle e i miei amici più cari, a tutti i rapporti veri che ci legano, che mi fanno sentire costantemente al sicuro.

Un ultimo speciale ringraziamento va a Carlotta, senza la quale silenziosa complicità questi cinque anni non sarebbero mai stati così intensi, a Giorgia e Flavio, punti fermi.