

INDICE

Introduzione	pag. 11
1. GLI STUDI SUI TERREMOTI NELLA STORIA E LE IMPLICAZIONI TECNICHE	15
1.1. I primi approcci al terremoto e lo sviluppo della trattatistica	15
1.2. Le nuove teorie sul terremoto nel XVII secolo	27
1.3. Lo sviluppo delle teorie e le tecniche d'intervento nel XVIII secolo	32
1.4. L'aggiornamento delle conoscenze nel XIX e XX secolo in relazione ad alcuni eventi sismici	41
1.5. La nuova visione del consolidamento strutturale in Italia; documenti e riferimenti normativi nell'ambito del restauro antisismico	56
2. LE NORME PER LA RICOSTRUZIONE DOPO GLI EVENTI SISMICI: ALCUNI ESEMPI	73
2.1. Indicazioni normative per la gestione delle emergenze e la ricostruzione dei centri danneggiati dal terremoto	73
2.2. I provvedimenti assunti per la ricostruzione della città di Norcia nel 1859	75
2.3. Le norme per la ricostruzione di Ischia dopo il terremoto del 1883	76
2.4. La ricostruzione in Liguria colpita dal terremoto del 1887	79
2.5. Le norme per la costruzione e il restauro degli edifici danneggiati dal terremoto delle provincie calabresi e in quella di Messina dopo il 1905	83

3. ANALISI DEI PRESIDI ANTISISMICI E DEL LORO EFFETTO NEL MIGLIORAMENTO DEI SISTEMI COSTRUTTIVI	85
3.1. L'applicazione dei presidi antisismici nella storia delle costruzioni	85
3.2. Alcuni esempi dell'uso dei presidi antisismici	86
3.2.1. <i>Archi di sbatacchio o di contrasto</i>	86
3.2.2. <i>Travi di radicamento e sistemi baraccati</i>	87
3.2.3. <i>Ringrossi a scarpa, speroni / contrafforti</i>	98
3.2.4. <i>Capriate con appoggi al muro su mensole</i>	99
3.2.5. <i>Tiranti e Catene</i>	99
3.3. Cerchiatura in ferro di elementi portanti	102
4. ESPRESSIONI DI UNA CULTURA SISMICA LOCALE NELLE MARCHE	107
4.1. Le Marche e l'esperienza del terremoto	107
4.2. Analisi di un caso studio: Camerino e i principali eventi sismici nella storia	113
4.3. L'interpretazione dei caratteri costruttivi negli edifici nel centro storico di Camerino	119
4.4. Analisi del comportamento degli edifici in aggregato attraverso il controllo di alcuni parametri costruttivi	138
Regesto dei Documenti sul danneggiamento degli edifici del centro storico di Camerino dopo il sisma del 1799	153
Riferimenti bibliografici	163
Profilo autoriale	179

INTRODUZIONE

«In tria tempora vita dividitur»

LUCIO ANNEO SENECA, *De brevitate vitae*, libro Decimo dei *Dialoghi*, 49 d.C. circa.

«*La vita si divide in tre tempi: il tempo che è stato, quello che è, e quello che sta per essere*». Secondo questa visione, il tempo e la memoria sono elementi fondativi per guardare al futuro con la speranza che possa svilupparsi una positiva evoluzione in tutti i campi del sapere umano.

Le domande, le interpretazioni, le scelte che si sono sviluppate a seguito dei terremoti, parlano del peso della distruzione e della fatica della ricostruzione.

Per questa ragione, il primo capitolo del volume è dedicato agli studi sui terremoti nella storia e le implicazioni tecniche. La formazione di un'efficace tecnologia antisismica, affrontata attraverso l'osservazione dell'evento catastrofico, è stata spesso ostacolata da fattori di vario ordine, fra cui in particolare ragioni di natura culturale. Il pensiero teorico sul terremoto fu per due millenni incardinato nella spiegazione di Aristotele, secondo cui i moti sismici dovevano essere generati dalla pressione dei venti sotterranei; la soluzione era quella di scavare accanto agli edifici degli appositi pozzi che fungevano da "sfiatatoi". Numerose fonti, qui selezionate, ci permettono di intravedere le idee che in passato si sono sviluppate sull'origine del terremoto e sui possibili rimedi di natura tecnica. Il volume è scandito dal succedersi di grandi terremoti accaduti nel mondo e in Italia, seguendo il filo rosso delle risposte sociali, politiche e culturali, le cui tracce gettano una luce particolare sulle incertezze del presente e sul ricorrere delle stesse problematiche. L'Italia è una nazione a forte rischio sismico, in cui i terremoti nel corso della storia hanno inciso su differenti aspetti della vita economica e sociale, provocando danni sia materiali che immateriali. Fra i beni materiali soggetti a fenomeni distruttivi, certamente il patrimonio architettonico (minore o di elevato pregio) ha sofferto nel corso dei secoli le trasformazioni più incidenti. Tale patrimonio, già in precarie condizioni, è stato frequentemente esposto alle azioni sismiche; negli ultimi quattro secoli si è verificato in media un evento ogni due anni e mezzo; fra questi, più di 170 hanno raggiunto intensità epicentrale uguale o maggiore rispetto al grado VIII della scala Macrosismica, che implica distruzioni estese, crolli diffusi e inagibilità di quasi la metà degli edifici. Chiese, palazzi, monasteri ma anche il diffuso tessuto edilizio in aggregato sono stati ricostruiti o largamente "ricuciti". La fase della ricostruzione è sempre stata particolarmente critica per la storia dei luoghi, perché oltre a riparare gli edifici, occorre ricostruire quel senso di appartenenza e di identità che costituisce uno dei valori principali della comunità locale. Nella storia delle costruzioni, inoltre, s'individua una relazione di causa-effetto tra un terremoto catastrofico e l'emanazione di una legge che impone nuove modalità di costruzione, essendo stata verificata l'inadeguatezza di ciò che si era progettato fino a quel momento. Il Capitolo secondo, attraverso alcuni esempi, analizza le norme per la ricostruzione dopo gli eventi sismici. L'idea e la capacità di difendersi dagli effetti dei terremoti è molto antica e percorre la storia, almeno dell'ultimo millennio, attraverso la pratica dei saperi costruttivi e tecnici. La sismologia storica ha fatto molti progressi negli ultimi anni e l'indagine delle fonti storiche ha permesso di ricostruire, sia pure in modo non ancora esaustivo, la storia sismica delle regioni italiane descrivendo gli effetti sismici locali. Con l'affidamento all'Istituto Nazionale di Geologia e Vulcanologia del coordinamento dei dati, si è conseguito un notevole arricchimento metodologico che ha portato all'omologazione delle rilevazioni, dei criteri di catalogazione e della compilazione di elenchi, partendo dalle varie fonti storiche. Attraverso i sismografi, l'attuale metodologia di rilevazione e di misurazione dei vari parametri per individuare e catalogare i terremoti ha raggiunto un alto livello di omogeneità, mentre le fonti storiche pre-strumentali si sono basate sulle esperienze dirette delle persone che hanno avvertito le scosse, trovandosi in luoghi diversi e in condizioni differenti. Le conseguenze sono state un flusso di dati discontinui, talvolta soggettivi. Le informazioni giunte fino a noi presentano molte lacune e difettano della scientificità necessaria, ma sono le uniche fonti che ci permettono di comporre una mappa degli eventi che si sono susseguiti nella storia. Lo studio delle fonti letterarie e archivistiche ha contribuito notevolmente alla comprensione del cantiere storico, fornendo indicazioni sui criteri costruttivi adottati in zona sismica e a partire dal XVIII secolo,

sulle modalità d'intervento che coinvolgono le preesistenze. L'analisi diretta degli effetti sugli edifici ha consentito di valutare le specificità esecutive, in particolare l'uso dei presidi antisismici, per aumentare la capacità portante. In tempi recenti è maturata la necessità di definire interventi per la riduzione del rischio sismico, che possano essere congruenti con il comportamento degli edifici esistenti.

Nel quadro dell'evoluzione costruttiva si è assistito tra Ottocento e Novecento ad un processo di progressiva sostituzione di materiali ed elementi costruttivi tradizionali. L'utilizzo dei nuovi materiali non ha, tuttavia, comportato un rapido fenomeno di sostituzione, bensì un lento processo di trasformazione che, per diversi decenni, ha visto la compresenza dei sistemi tradizionali con quelli moderni. Nel XIX secolo, gli studi sulla sismica progrediscono, ma senza esiti concreti nel campo delle costruzioni: fino ai primi del Novecento, la tecnica usata è ancora la "baraccatura". Alcuni devastanti eventi sismici, come quello di Messina del 1908, hanno favorito una presa di coscienza, per affrontare il problema in termini di ricostruzione e prevenzione tecnica.

Per comprendere l'evoluzione tecnologica degli edifici antisismici è possibile analizzare *Manuali* redatti tra la fine dell'Ottocento e l'inizio del Novecento. Tali pubblicazioni, intese quale fonte e strumento di conoscenza del costruito, documentano prassi diffuse e consolidate, attraverso le quali si sviluppano problematiche di natura tecnica e nuove soluzioni progettuali. In tempi recenti è, dunque, maturata la necessità di definire interventi per la riduzione del rischio sismico, che possano essere congruenti con il comportamento degli edifici esistenti. Il nuovo approccio recepito dalle Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 e dalla relativa Circolare esplicativa deriva dalla lunga esperienza italiana. L'ingegneria sismica, nella sua configurazione attuale, si è sviluppata attraverso l'esame dei fenomeni osservati sul campo ogni volta che, in qualche parte del territorio italiano, è avvenuto un terremoto distruttivo. La crescita delle conoscenze acquisite, maturata interpretando la realtà osservata, ha richiesto più volte di apportare modifiche alle concezioni che governano il progetto antisismico; modifiche necessarie per raggiungere precisi obiettivi di sicurezza. La revisione delle *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale* recita:

«Qualsiasi tipo d'intervento di riduzione del rischio sismico presuppone, infatti, una conoscenza approfondita del manufatto su cui si intende intervenire, sotto il profilo storico, architettonico, tipologico, strutturale, nonché materico (anche dal punto di vista della stratigrafia degli elevati, secondo le procedure dell'archeologia dell'architettura, e della padronanza tanto delle diverse espressioni locali delle tecniche tradizionali e della loro adozione secondo la "regola dell'arte", quanto dei presidi antisismici adottati nel tempo nei diversi contesti storico-geografici e della loro efficacia). A meno che non si tratti di edifici isolati, tale conoscenza deve essere completata da quella relativa all'aggregato in cui il manufatto è inserito e quindi occorre analizzare l'ambito urbano a cui esso appartiene (anche dal punto di vista della comprensione delle invarianti territoriali dei paesaggi storici e delle invarianti processuali degli insediamenti urbani, nonché delle pratiche antisismiche adottate nel tempo a questa scala)».

La progettazione antisismica è diventata sempre più difficoltosa man mano che si è compreso come la si deve affrontare. Lo ha dimostrato la complessità dell'attuale normativa quando ha dovuto abbandonare le semplificazioni basate sugli abituali criteri dell'ingegneria strutturale tradizionale.

Il criterio fondamentale delle costruzioni antisismiche è quello di realizzare opere che consentano di salvare sempre e comunque le vite umane, pur sacrificando l'indennità strutturale. In questo caso la struttura resistente dell'edificio, progettata secondo alcuni specifici criteri potrà anche deformarsi in maniera considerevole, uscendo dal campo elastico, con fessurazioni ampie e diffuse; l'opera potrà anche essere soggetta a crolli parziali, ma dovrà, comunque, sempre essere progettata per evitare, o almeno ritardare, il collasso totale, in modo da consentire una via di fuga verso un luogo sicuro.

Si tratta, dunque, di dosare il livello di sicurezza appropriato, in funzione della destinazione d'uso e del grado di pericolosità che può essere stimato con metodi probabilistici. Dopo aver ipotizzato un modello teorico su cui basare la progettazione, possono essere utilizzati vari metodi, tra cui:

- adozione di nuclei di irrigidimento come setti, vani ascensore o scale, che tendono ad assorbire le azioni orizzontali essendo rigidamente collegati al resto della struttura.
- adozione del criterio della gerarchia delle resistenze: si studia la struttura in modo che le cerniere plastiche si formino nelle travi prima che nei pilastri (pilastro forte - trave debole) in modo tale che il meccanismo di collasso venga attivato dopo la formazione di moltissime cerniere plastiche;
- progettazione accurata dei nodi strutturali, cioè delle unioni fra gli elementi;
- uso delle cosiddette catene per aumentare la resistenza della struttura soprattutto per gli edifici in muratura;
- adozione di dissipatori elasto-plastici che vengono posti in posizioni soggette a elevate deformazioni, attenuando i movimenti ed eventualmente arrivando a rottura, dissipando energia, per preservare l'integrità strutturale.

Come afferma Emanuela Guidoboni, riferimento mondiale per gli studi di ingegneria sismica in una prospettiva storica, le vicende italiane sono purtroppo caratterizzate da difficoltà e tragedie, che vanno comprese con nuove categorie di analisi. Da un lato possiamo mettere in luce le capacità della popolazione italiana, la sua forza di ripresa

e di sopravvivenza, la sua attitudine a sviluppare resilienza; ma dall'altro, il succedersi delle distruzioni sismiche nei secoli mostra un rapporto culturale distorto con il futuro, che non sembra modificato in modo significativo nel tempo, quasi un'incapacità di prendere coscienza dei possibili futuri danni prima che essi accadano.

La storia ci insegna che la normativa antisismica viene solitamente aggiornata a seguito di un evento particolarmente importante. Attraverso l'analisi delle fonti documentarie e archivistiche è possibile tracciare un breve *excursus*, concentrando l'attenzione su quanto è stato sviluppato in relazione ai differenti terremoti; l'arco temporale preso in considerazione va dal mondo antico alla fine del Settecento, rappresentando quest'ultimo il termine in cui poter collocare l'avvio dell'ingegneria come scienza. Le ricerche storiche sui terremoti in Italia, dal mondo antico al XX secolo, hanno messo in luce la variabilità di tale concetto, che emerge dai trattati teorici, dai saperi pratici e dai progetti formulati dopo gli eventi catastrofici. Difendersi dai terremoti era un obiettivo alla cui realizzazione concorrevano diversi fattori che oggi chiameremo fattori di vulnerabilità, soprattutto culturali, economici e sociali. Oggi le moderne tecnologie antisismiche, sviluppate a partire dal XIX secolo, si basano sugli studi scientifici della propagazione delle onde, della tettonica delle placche e dei nuovi materiali. La comprensione del comportamento "elastico" delle onde sismiche è alla base dello sviluppo di tecnologie, fra antiche e moderne, che possono consentire di proteggere gli edifici dalla forza distruttrice dei terremoti.

Nel capitolo 3 sono, infatti, analizzati i presidi antisismici, adottati per un miglioramento del sistema costruttivo. La creazione di contrafforti e speroni, la disposizione delle catene metalliche per il collegamento di pareti e per il contenimento della spinta degli archi e delle volte, la costruzione di archi esterni di sbatacchio fra gli edifici, la collocazione di travi lignee all'interno delle murature, come anche i sistemi di listatura nelle murature irregolari o le angolate realizzate con pietre squadrate di grandi dimensioni, rappresenta il tentativo di contrastare l'effetto del terremoto, adottando, si direbbe oggi, una strategia resiliente. Probabilmente i costruttori antichi ignoravano i concetti di "sollecitazione puntuale", "stato limite", "tensione di snervamento", ma certamente avevano constatato che in caso di terremoto, i muri costruiti accuratamente, con pietre squadrate, elementi di collegamento trasversali, dormienti inseriti ad intervalli regolari, resistevano meglio di quelli realizzati con ciottoli, o con pietre irregolari debolmente connesse. Inoltre, avevano verificato che le parti più sollecitate erano gli spigoli degli edifici, a meno che questi non fossero stati rinforzati con pietre più lunghe e ben ammorsate tra loro, o in sostituzione con l'uso di strutture in legno a formare un reticolo. Gli antichi avevano anche osservato che i manufatti leggeri soffrono meno danni di quelli pesanti, che alcune strutture flessibili, pur deformandosi vistosamente, superano l'evento con danni inferiori a quelli subiti da strutture molto più rigide. A parità di altri fattori che caratterizzano la scossa (accelerazione, spostamento, direzione, durata, ecc.), le sollecitazioni subite dai manufatti sono direttamente proporzionali all'energia che viene scaricata su di loro, ma occorre considerare anche la natura del suolo di appoggio. Dal punto di vista dell'azione prodotta dal sisma sulle costruzioni, devono essere distinte le caratteristiche del terremoto e gli effetti di sito dovute ai vari tipi di terreno a contatto con le fondazioni. Di norma, quanto più scadenti sono le caratteristiche geotecniche dei suoli, tanto maggiore è l'effetto di amplificazione dell'azione sismica trasmessa alle costruzioni. La presenza di rilievi topografici genera fenomeni di riflessione delle onde, che provocano una focalizzazione con aumento locale del loro effetto. Inoltre, al passaggio delle onde dalla roccia ai terreni più molli si manifestano fenomeni di impedenza meccanica che si traducono in effetti diffrattivi e in un'amplificazione delle onde di superficie. Uno dei temi più complessi è rappresentato dall'analisi delle costruzioni in muratura, per la specificità del loro comportamento e delle soluzioni tecniche adottate negli interventi di consolidamento. L'eterogeneità dei materiali e la irregolarità geometrica rendono complessa la modellizzazione dell'edificato storico e, di conseguenza, l'applicazione di moderni criteri di calcolo. Nel capitolo 4, vengono declinate le espressioni di una cultura sismica locale nelle Marche, prendendo come riferimento il caso studio di Camerino che in più occasioni è stato danneggiato dagli eventi sismici. Questo ha contribuito alla creazione di un'edilizia "palinsesto" particolarmente complessa, resa più vulnerabile da numerosi interventi di riparazione, con edifici di pregio che sono stati ricostruiti a "strati", adattati, manipolati per far fronte a rovine e dissesti; in molti casi tali riparazioni non risultano efficaci e tutto viene nuovamente messo in discussione in concomitanza di un nuovo evento. Camerino è stato interessato dal terremoto Umbria-Marche del settembre-ottobre 1997 e del marzo 1998. Il sisma di magnitudo 6.0 ha provocato ingenti danni che sono stati riparati secondo le indicazioni fornite dalla normativa e secondo i Piani predisposti dalle Regioni. Il 26 ottobre del 2016 un terremoto di magnitudo 5.9 ha interessato decine di città e borghi dell'Appennino Maceratese, decuplicando il "cratere" sismico generatosi con le scosse del 24 agosto ad Amatrice, Arquata del Tronto e Accumoli. Oggi, a sette anni di distanza, il centro storico di Camerino, come molti altri delle Marche centro meridionali è ancora "zona rossa", dove i lavori di ricostruzione sono stati avviati fra innumerevoli difficoltà e lentezze.

Viene illustrata, in particolare, una metodologia di ricerca per una comprensione del costruito e dei fenomeni che lo hanno interessato; questo per individuare le tecniche d'intervento che, risultando efficaci, possono essere replicate e quelle che devono essere implementate, in quanto non consentono di raggiungere un adeguato miglioramento strutturale, in grado di evitare il ripetersi nel futuro di eventi catastrofici.

GLI STUDI SUI TERREMOTI NELLA STORIA E LE IMPLICAZIONI TECNICHE

1.1. I primi approcci al terremoto e lo sviluppo della trattatistica

Il catalogo dei terremoti avvenuti in Italia ci aiuta a comprendere la natura sismica dell'intera penisola, documentando eventi fin dalle epoche più remote¹. Il 62 d.C. segna l'inizio di una serie di terremoti che accompagnarono Pompei fino alla completa distruzione, causata dall'eruzione del Vesuvio del 79 d.C.². Gli effetti di tali eventi sismici sono ancora oggi presenti sui manufatti e, opportunamente decodificati, rappresentano dati preziosi per meglio definire la storia della costruzione e gli interventi adottati per la riparazione e il consolidamento³. L'evento più importante colpisce Pompei il 5 febbraio del 62 d.C. Questa datazione è stata a lungo dibattuta tra i filologi, divisi tra la testimonianza di Tacito riportata negli *Annales* che include il sisma tra gli eventi dell'anno 62 e quella di Seneca che riferisce nel *Liber VI* l'anno 63 d.C.⁴.

La definizione dell'intensità del sisma, basata sui danni subiti dalle costruzioni, ha rappresentato l'argomento di un intenso dibattito sviluppatosi fra XIX e XX secolo. Una *vexata quaestio* vede i sismologi divisi, sia nella valutazione dell'intensità, sia nell'individuazione delle sorgenti sismogenetiche. Secondo Mercalli, si tratta di «un gran terremoto avvenuto il 5 febbraio 62 che aveva interessato Ercolano⁵, Pompei, Stabia, Nocera e Pozzuoli» e la sua posizione è ribadita da Baratta⁶; i più aggiornati studi riferiscono che la magnitudo sia stata di grado elevato e che la genesi del fenomeno sia da ricondurre all'attività precorritrice dell'eruzione. Il posizionamento di un contrafforte in muratura nell'area del *destrictarium* (settore ovest delle Terme Stabiane) testimonia le conoscenze sugli effetti del terremoto nei confronti dei muri in elevato e sui possibili presidi da realizzare, come soluzione rapida e poco costosa per evitare il ribaltamento. Inoltre, la riduzione dello spessore in altezza va ad ottimizzare la geometria del presidio, favorendo la risposta alle sollecitazioni ribaltanti conseguenti alle azioni orizzontali derivanti dal terremoto⁷.

Fra i primi grandi terremoti di cui abbiamo notizia si deve elencare l'evento che colpisce l'Italia centrale nel 217 ed ha conseguenze distruttive in gran parte della penisola⁸. Dopo questo, si verificano altri eventi sismici in tutto il territorio italiano, ma i più frequenti e con alta magnitudo sono concentrati nelle regioni centromeridionali. L'atteggiamento adottato rispetto a questi eventi catastrofici è sempre fatalistico e guidato dall'interpretazione del sisma come punizione divina, per questo si ricorre ogni volta ad una ricostruzione di quanto è caduto.

¹ *Catalogo dei Forti Terremoti in Italia dal V sec. a.C. al XX* è uno strumento prezioso di carattere multidisciplinare che nel tempo si è arricchito di contenuti che consentono di analizzare, se correttamente utilizzati la storia sismica locale. <https://emidius.mi.ingv.it/ASMI/study/CFTI5med> [consultato il 05-10-2021].

² DE SIMONE 1995, pp.37-43; RENNA 1995, pp.194-199; VARONE 1995, pp.29-35.

³ RUGGIERI, GALASSI, TEMPESTA 2018, pp.72-91.

⁴ LECOCQ 1949, pp. 85-91, in part. p. 89; ANDREAU 1973, pp. 369-395; HENRY 1982, pp.174-192; HINE 1984, pp. 266-269; MAIURI 1955, p.36-41 menziona il 63 come anno in cui Pompei venne colpita dal terremoto; qualche anno dopo, corregge la data indicando il 62.

⁵ Sull'uso di tecniche di prevenzione nell'antichità, PAPACCIO 1989, pp.609-615.

⁶ MERCALLI 1883, p. 282; BARATTA 1901, pp.36-37.

⁷ RUGGIERI, GALASSI, TEMPESTA 2018, pp.82-89. All'effetto ribaltante dei muri, i romani tentarono di porre rimedio mediante l'inserimento di contrafforti e in alcuni casi con la realizzazione di ringrossi murari.

⁸ Uno dei terremoti di cui si hanno notizie storiche è quello che si sviluppa nel 217 tra Siena e il lago Trasimeno, con un grado di magnitudo stimato in 6,5. L'evento, avvertito in gran parte dell'Italia centrale, trova conferma nelle cronache della battaglia del Trasimeno durante la Seconda Guerra Punica. <http://www.6aprile.it/conoscere-i-terremoti/2012/06/27/i-terremoti-piu-forti-della-storia-ditalia.html> [consultato il 05-10-2021].

Fra l'anno 1000 ed il 1490, si sono registrati 73 terremoti di intensità medio forte. Non si hanno molte notizie per quelli sviluppatasi nell'alto medioevo, ma sappiamo che, nella seconda metà del primo millennio dopo Cristo, Roma, Benevento, Spoleto e l'Irpinia, subirono una serie di fortissimi terremoti. Nel Medioevo latino si usavano un gran numero di parole specifiche e di concetti per definire i singoli tipi di calamità naturali. Per citarle gli scrittori medievali adottarono in un primo momento concetti e termini già in uso nella tarda antichità. Per *terremoto* assunsero le parole *terrae motus*, che sono giunte anche nelle lingue romanze romaniche. Il termine utilizza un elemento essenziale, il movimento della terra, per definire linguisticamente il fenomeno. Isidoro di Siviglia nel VII secolo lo definisce come “*terrae commotio*” e Saba Malaspina nel XIII secolo “*orbis concussa*”; sono concetti che indicano un'interpretazione allegorica del terremoto come segno dell'ira di Dio⁹. In altre occasioni ci si riferiva ai passi della Bibbia secondo i quali il terremoto sarebbe stato inteso come *visitatio Dei*¹⁰. A tutti i fedeli erano noti il terremoto verificatosi in occasione della morte di Cristo (Matteo 27,51 e sgg.) e quello annunciato nell'*Apocalisse* (*Apocalisse* 16, 18) per la fine del mondo, come punti di riferimento esegetici. L'interpretazione dei terremoti come segni dell'ira divina e come ammonimento alla penitenza è stata enfatizzata da predicatori, mediante manifesti; tale interpretazione trovò raffigurazione in trittici e xilografie, e venne discussa criticamente nei trattati sui terremoti¹¹. Diffusa era l'opinione che esistesse una *causa naturalis*. I modelli interpretativi provenienti dalle scienze naturali si basavano su conoscenze trasmesse dall'antichità. I filosofi greci tendevano a riferire la causa dei terremoti a uno degli elementi primari, terra, acqua, fuoco, aria, oppure a una loro combinazione¹². Il primo di cui possediamo una riflessione teorica sui terremoti è comunemente ritenuto anche il primo filosofo, Talete di Mileto (ca. 630-545 a.C.). Egli considerava la terra come una zattera galleggiante sopra l'acqua; il terremoto corrispondeva allo scuotimento della terra a causa di movimenti dell'acqua, sia in periodi di troppa piovosità che di troppa siccità. A sostegno della sua teoria, sottolineava l'emergere di nuove sorgenti dopo ogni sisma. Anassagora di Clazomene (580-428 a.C.) propone una teoria simile a quella delle caverne sotterranee, ritenendo che la causa dei terremoti era legata all'etere e al fuoco interno della terra. L'etere, compresso, avrebbe scosso la terra e il fuoco, consumando i sostegni interni, avrebbe provocato il crollo delle parti superiori. Anassimene di Mileto (550-480 a.C.) elabora una teoria legata a crolli localizzati nelle caverne sotterranee, mettendo il fenomeno in relazione a periodi di siccità alternati alle grandi piogge; la terra, inumidendosi e disseccandosi, si sarebbe spaccata con la conseguente caduta delle falde interne. Democrito di Abdera (460-370 a.C.) riprende la teoria di Talete, sostenendo differentemente che la terra fosse piena d'acqua e il movimento dell'acqua in pressione avrebbe provocato una scuotimenti interni¹³. Quella più diffusa, e che durò più a lungo fu la teoria aristotelica dello *pneuma*, più nota come “teoria dei venti sotterranei” che erano generati da diversi stati della materia terrestre (caldo/freddo, umido/secco)¹⁴.

Questi modelli antichi venivano assimilati e fatti propri dalla cultura corrente, in forma piuttosto vaga e collegata ad un modello interpretativo di carattere religioso. Una maggiore precisione fu assunta dai modelli provenienti dalle scienze naturali con la ricezione di Aristotele nel pieno Medioevo, mediata dall'arabo e la sua acquisizione Scolastica. Tali conoscenze non trovarono diffusione se non nelle corti monarchiche e fra i religiosi. Nel tardo Medioevo questi modelli interpretativi si diffusero anche al di fuori delle ristrette cerchie accademiche. Ad esempio, la parola *disastru/disastro* è attestata per la prima volta agli inizi del Trecento¹⁵. L'idea della occasionalità del terremoto si è protratta per secoli nel sentire comune delle persone coinvolte e per certi versi sopravvive ancora oggi, a dispetto delle conoscenze scientifiche consolidate in merito alle cause geologiche che originano gli eventi sismici¹⁶. La difficoltà ad intraprendere una corretta analisi degli effetti di un sisma storico è causata, oltre che dalla mancanza di dati certi sull'entità dell'energia scatenata e sull'andamento delle onde, anche dall'ignoranza di fattori

⁹ SCHENK 2010, pp.27-28.

¹⁰ Nella *Bibbia*, *Libro di Giosuè* si legge: «Allora il popolo lanciò il grido di guerra e si suonarono le trombe. Come il popolo udì il suono della tromba ed ebbe lanciato un grande grido di guerra, le mura della città crollarono» (6: 16-27). Anche nell'episodio della morte di Sansone è evidente che il crollo del tempio dove Sansone trovò la morte insieme ai suoi nemici può rifarsi ad un terremoto. *Libro dei Giudici*, 16: «Sansone ... curvò con tutta la forza e la casa rovinò addosso ai capi e a tutto il popolo che vi era dentro», CONTI 2010, pp. 241-287.

¹¹ BUSÀ 2021, pp.421-428.

¹² PICCARDI, BLUMETTI 2020, pp. 459-484. Il pensiero dei primi filosofi sui terremoti ci è pervenuto come notizia riportata e discussa nelle opere di autori posteriori, che si occuparono di questioni naturali, quali Aristotele (*Meteorologia*, libro II), Lucrezio (*De rerum natura*, libro VI), Seneca (*Questioni naturali*, libro VI) e Plinio il Vecchio (*Storia naturale*, libro II).

¹³ PICCARDI, BLUMETTI 2020, p.468.

¹⁴ ANDOLFO 1997, pp. 82-125.

¹⁵ SCHENK 2010, p.37.

¹⁶ GUIDOBONI, POIRIER 2019, p.53. Per la prima volta è delineata la storia culturale del terremoto, in un percorso che dalle antiche civiltà mediterranee conduce fino ad oggi. Le domande, le interpretazioni, le scelte che si sono susseguite attorno al terremoto parlano delle paure, del peso sociale ed economico delle distruzioni e della fatica della ricostruzione. Il pensiero teorico sul terremoto, per due millenni incardinato nella spiegazione di Aristotele e nelle sue varianti, ha avuto certezze e dubbi, in una secolare dipendenza da visioni religiose, poi affrancato da inquietudini e tragici conflitti.

che possono avere influito in modo differente su ogni singolo edificio, come le caratteristiche geomorfologiche dell'area interessata dai fenomeni, la tipologia di fondazioni, raramente indagate, il tipo di materiale e la tecnica utilizzata nella costruzione¹⁷.

L'arte ha inoltre rappresentato in diverse occasioni la distruzione a seguito di eventi sismici, come ad esempio Giotto che nel ciclo di affreschi per la basilica inferiore di Assisi dipinge di un bambino morto nel crollo di una casa a seguito del terremoto. L'area umbra è stata interessata da vari terremoti nel corso della sua storia, e parte del patrimonio medievale è andata persa a causa di eventi catastrofici¹⁸.

Fra i terremoti più studiati dobbiamo ricordare una serie di eventi distruttivi che si verificano nell'Italia settentrionale, nel 1117¹⁹. Questo terremoto è il più antico evento sismico per il quale si sia riusciti a stimare l'epicentro e la magnitudo, tramite l'utilizzo di tecniche analitiche, utilizzando la stessa metodologia che viene adottata per analizzare terremoti più recenti; tale risultato è stato ottenuto mediante l'analisi delle testimonianze documentali²⁰. Si tratta, quindi, di un evento eccezionale non solo per l'ampiezza delle distruzioni ma anche perché il suo studio ha restituito uno spaccato della cultura italiana ed europea, rendendo evidente il livello di pericolosità sismica a cui è soggetta un'ampia porzione della pianura padano-veneta. Inoltre, la documentazione riguardante la riforma cluniacense che precede di poco l'evento sismico ci consente di fare una serie di osservazioni sullo stato degli edifici, distinguendo gli interventi operati per l'adeguamento alla riforma da quelli di riparazione dei danni.

Nel mondo antico era abbastanza diffuso abbandonare un luogo colpito da un terremoto distruttivo. L'abbandono era collegato alla pericolosità del sito colpito da fenomeni assimilabili alla categoria dei *prodigia*, percepiti in modo superstizioso, e tali da rendere i luoghi non più sicuri in una prospettiva futura²¹. Diversi autori latini hanno trattato degli eventi legati allo svilupparsi di un terremoto, fra cui Varrone, Plinio, e soprattutto Vitruvio (I sec. a. C.), secondo il quale, il "buon costruire" è imperniato su tre principi base: *firmitas*, *utilitas* e *venustas*²². La stabilità costruttiva di un edificio doveva coniugarsi con la sua funzione d'uso e con la bellezza. Questi principi rimangono quasi immutati anche nella tarda antichità e nell'alto medioevo: si pensi a Procopio di Cesarea (VI sec.), che nell'opera *De aedificis* presenta una serie di interventi edilizi voluti da Giustiniano, per il rinforzo strutturale in aree ad elevata sismicità, come l'Armenia e l'attuale Turchia. Il problema di limitare gli effetti dei terremoti, o di cercare di impedirli, trova soluzioni specifiche nei saperi pratici del mondo romano, mentre nella trattatistica ci si rifaceva alla teoria²³.

¹⁷ CODEN 2010, pp. 7-24.

¹⁸ Un'accurata ricognizione dei principali terremoti storici dell'area umbro-marchigiana è stata curata da Viviana Castelli <https://emidius.mi.ingv.it/GNDT/T19970926/schede1279-1879.html> [consultato il 12-01-2022].

¹⁹ La fortuna storica e critica di questi eventi è sottolineata da GUIDOBONI, COMASTRI 2005, pp. 87-88. Sembra accertato che tre sismi si susseguirono a breve distanza di tempo all'inizio del 1117: il primo, poco prima del sorgere del sole, fra il 2 e il 3 gennaio, avrebbe avuto come epicentro un luogo a nord delle Alpi (p. 84); il secondo, nel pomeriggio del 3 gennaio, si sarebbe sviluppato a sud delle Alpi, interessando in modo particolare la pianura Padana fra Veneto, Lombardia ed Emilia (pp. 86-87); il terzo avrebbe avuto luogo nella Toscana nord-occidentale (pp. 12-15). BOSCHI, GUIDOBONI 1991, pp. 22-35; GALLI 2005, pp. 87-100; GUIDOBONI, COMASTRI, BOSCHI 2005, pp. 8-12.

²⁰ La magnitudo (intesa come magnitudo momento: Mw) è la misura strumentale assoluta dell'energia liberata dal terremoto, a prescindere dagli effetti prodotti. L'intensità esprime invece, in scala crescente, gli effetti provocati dal terremoto sull'uomo, sull'ambiente e sulle cose, indipendentemente dall'energia del terremoto. L'intensità epicentrale (Io) è mediamente quella più alta all'epicentro (e può essere minore della massima, Imax), mentre quella valutata localmente per località è definita di sito (Is). L'insieme delle Is costituisce il piano quotato del terremoto, rappresentabile sia in maniera discreta (con ciascun punto di osservazione), sia continua, tramite "isosisme" (curve che separano aree ad intensità diversa) o campiture a colorazione crescente. Storicamente, in Italia si utilizza la già nominata intensità MCS (presente per tutti gli eventi storici in catalogo), anche se recentemente si sta tentando di utilizzare una scala più analitica, detta EMS (European Macroseismic Scale). Per i terremoti pre-strumentali, cioè quelli prima del Novecento, sono stati definiti degli algoritmi per il calcolo di una magnitudo equivalente, basata sulla distribuzione del piano quotato macrosismico.

²¹ Le ricerche rivolte ad episodi catastrofici di questo tipo presentano risvolti non secondari relativamente al fascino che esercitarono sull'uomo fin dall'epoca medioevale, QUENET 1991, pp. 13-16. Lo stesso evento del 1117 dimostra come questa tendenza sia ancora ben presente. GUIDOBONI 1991, pp. 119-121; MARMO 1989, pp. 286-307.

²² GROSS 1997, p. 32: «Tutte queste costruzioni devono avere requisiti di solidità, utilità e bellezza. Avranno solidità quando le fondamenta, costruite con materiali scelti con cura e senza avarizia, poggeranno profondamente e saldamente sul terreno sottostante; utilità, quando la distribuzione dello spazio interno di ciascun edificio di qualsiasi genere sarà corretta e pratica all'uso; bellezza, infine quando l'aspetto dell'opera sarà piacevole per l'armoniosa proporzione delle parti che si ottiene con l'avveduto calcolo delle simmetrie». Nel XVII secolo, Claude Perrault, sviluppa una semplificazione del trattato proponendo la fortunata formula (triade vitruviana) per cui l'architettura deve soddisfare tre categorie: *firmitas* (solidità); *utilitas* (funzione, destinazione d'uso); *venustas* (perfezione di bellezza). PERRAULT 1673, p. 76.

²³ CAIROLI GIULIANI 2011, pp. 42-46. MARMO 1989, pp. 170-178. Secondo le fonti, Giustiniano dovette ricostruire Antiochia a un livello di circa 6 m sopra le rovine spianate dopo il terremoto del 526. Sulle ceneri causate dalla confusione e dal disordine, il nuovo ordine urbanistico, più solido e monumentale, doveva essere il lato tangibile del nuovo ordine politico e spirituale, sostenuto da Dio, che dal suo regno si sarebbe proteso nei secoli in avanti. L'area fra la Turchia e l'Iran, recentemente investita da un devastante terremoto, è stata sempre una regione ad elevata sismicità di cui si erano accorti anche gli antichi. Il primo terremoto avvenne il 13 dicembre 115 con magnitudo stimata in 7,5. Era in corso dall'anno precedente la campagna partica con cui Traiano sarebbe arrivato ad annettere all'Impero i territori dell'attuale Iraq. Cassio Dione Cocceiano nella *Storia romana*, LXVIII, 24, 1-6, narra che «Mentre l'imperatore Traiano si trovava a soggiornare in Antiochia, un terribile terremoto colpì la città. C'erano stati molti temporali e vento portentoso, ma nessuno si sarebbe mai aspettato tanti mali tutti insieme. Per prima cosa si sentì improvvisamente un grande boato, seguito da un tremore della terra tremendo. Tutta la terra si alzava, molti edifici crollarono, altri si alzavano da terra per poi crollare e rompersi in pezzi al suolo, mentre altri erano sballottati qua e là, come se si trattasse di un'onda del mare, e poi rovesciati, e la distruzione colpì fino all'aperta campagna. Il crollo dei palazzi e la rottura di travi di legno insieme con piastrelle e pietre fu terribile, e una quantità inimmaginabile di polvere si levò, tanto che era impossibile per uno vedere qualcosa o parlare o sentire una parola. Per quanto riguarda le persone, molte che erano fuori casa, furono gettate

Inoltre, l'impegno dei teorici dell'architettura e dei governi era focalizzato sulle grandi opere pubbliche (fortezze, chiese, acquedotti), mentre scarsa considerazione era rivolta all'edilizia minore, considerata campo di mera prassi artigianale. Il primo documento della cultura occidentale che parla esplicitamente delle cause e degli effetti dei terremoti, nonché di accorgimenti costruttivi destinati a ridurre l'impatto del terremoto sugli edifici, è la *Naturalis Historia* di Plinio²⁴, dove vengono descritti i ripari più sicuri ai movimenti sussultori e ondulatori che inducono diversi comportamenti delle fabbriche. Le pareti di mattoni sono indicate come le più resistenti in quanto subiscono meno danni e i punti più sicuri e resistenti di un edificio sono indicati negli archi, nelle volte, e negli angoli formati dai muri e le porte, perché qui le spinte contrapposte si bilanciano. Per il lungo periodo medievale non si rilevano tracce scritte su come abitare in modo sicuro. La precarietà della vita quotidiana induce ad accettare una calamità distruttiva come il terremoto in chiave etica e spirituale. Le distruzioni sismiche erano considerate una disgrazia occasionale fra le molte (guerre, pestilenze, carestie) che minacciavano la vita umana.

L'utilizzo di tecniche antisismiche non è specificamente attestato nel trattato vitruviano dove sono illustrati alcuni metodi per rendere gli edifici resistenti e duraturi già conosciuti nel mondo romano; veniva raccomandata la realizzazione di fondazioni ampie e spesse, mura con archi di scarico al loro interno, pilastri angolari esterni più larghi e più solidi, speroni o contrafforti di rinforzo per le sostruzioni. Viene istituita una distinzione fra "casa muraria" e "casa intelaiata"

«Se dunque nel primo ho trattato de' doveri dell'arte, in questo dovrò trattare de' materiali, e del lor uso. Questo libro non tratta già dell'origine dell'Architettura, ma de' principj delle fabbriche, e del modo come sono state le medesime migliorate, e tirate alla presente perfezione. È chiaro, dunque, che secondo l'ordine questo era il luogo del presente libro. Ritorrerò ora al proposito, e tratterò de' materiali, che sono atti agli edifizj, e del modo come pare, che sieno stati generati dalla natura, e con quale mistura di elementi sia temperato il loro composto, sicchè io possa essere chiaramente inteso. Imperciocchè nessuna specie di materiali, di corpi, o di cosa alcuna non si può formare senza il mescolamento di questi elementi, nè essere i medesimi sottoposti a' nostri sensi; nè si possono, secondo gl'insegnamenti de' fisici, in altro modo spiegare le cose naturali, se non si dimostrano con sottili ragioni le cause, che sono nelle cose, come, e perchè così sieno»²⁵.

La funzione di contrasto alle spinte del terreno in presenza di una sostruzione esercitata da contrafforti è conosciuta da Vitruvio (VI, 8, 7) «*item in extremis angulis cum recessum fuerit ab anteriore angulo spatio altitudinis substructionis, in utramque partem signetur, et ab his signis diagonius structura conlocetur et ab ea media altera coniuncta cum angulo muri*», ma l'autore latino non fa menzione dell'uso di contrafforti per riparare danni da fuori piombo, ma, considerando che essi servono a contrastare la spinta obliqua del terreno retrostante, ammette comunque un contributo di taglio.

Si enumerano varie situazioni in cui i contrafforti sono stati inseriti in una seconda fase costruttiva, per ragioni di consolidamento a seguito di eventi sismici. Due esempi sono illustrati da Cairoli Giuliani²⁶; il primo è quello del Palazzo Sessoriano a Roma, per la parte conosciuta come il Tempio di Venere e Cupido, dove «due contrafforti molto meno aggettanti furino posti a contenere la parte convessa dell'abside in corrispondenza dei maschi murari compresi tra le finestre; altri due grandi elementi triangolari, dello spessore di 3,35 m, furono eretti per impedire che l'arcone frontale della nicchia si aprisse».

violentemente verso l'alto e poi a terra, come se fossero caduti da un'alta rupe; altri furono uccisi e mutilati. Anche gli alberi, in alcuni casi, sobbalzarono con le radici e tutto il resto. Il numero di coloro che rimasero intrappolati nelle case e morirono aumentò, molti furono uccisi dalla forza stessa della caduta di detriti, e un gran numero furono soffocati sotto le rovine. Coloro che giacevano con una parte del loro corpo sepolto sotto le pietre o le travi di legno, patirono una morte terribile, non essendo in grado di vivere troppo a lungo, ma neppure di trovare una morte immediata».

²⁴ Plinio introduce un primo sistema di isolamento degli edifici che consiste nel costruire su terreni omogenei sabbiosi interponendo tra le fondazioni e il terreno uno strato di lana o carbone. I "cuscinetti" di terra molle o sabbia erano spesso utilizzati sotto le antiche costruzioni; il sistema era stato impiegato per il tempio di Artemide a Efeso (fondazione 550 a.C.): «è cosa degna di ammirazione per la magnificenza greca il tempio di Diana che ancora esiste a Efeso, la cui costruzione impegnò tutta l'Asia minore per 120 anni. Lo eressero in una zona palustre, perché non dovesse subire terremoti o temere spaccature del suolo scivoloso e instabile, si pose al di sotto di esse uno strato di frammenti di carbone e un altro di velli di lana - *Grecae magnificentiae vera admiratio admiratio extat templum Ephesiae Dianae CXX annis factum a tota Asia. In solo id palustri fecere, ne terrae motus sentiret aut hiatus timeret, rursus ne in lubrico ne in lubrico atque instabili instabili fundamenta tantae molis locarentur, calcatis ea substravere carbonus, dein velleribus lanae*»; si veda P. PORTOGHESI, Editoriale, in «Materia per l'Emilia», 75-76, giugno 2013, pp. 24-26. Le fondazioni dei templi di Paestum, molto profonde, poggiano su un cuscino di sabbia che le separa dal fondo roccioso, e consentono di mantenere basso il baricentro degli edifici, con una vulnerabilità sismica ampiamente nei limiti di sicurezza, secondo recenti misurazioni strumentali e calcoli strutturali. I templi possono essere intesi come strutture scatolari non rigide, ma snodabili, sostenute dal loro peso ma nello stesso tempo elastiche e tali da assorbire le scosse, anche in considerazione delle poderose fondamenta. Anche le mura di Troia si avvalevano di questo stratagemma, mentre sono frequenti edifici romani la cui struttura muraria sembra concepita in funzione del terremoto con rinforzi angolari di varia entità. Un esempio significativo è l'edificio chiamato 'Mura di S. Stefano' nei pressi del lago di Bracciano, appartenente probabilmente alla villa di Calo Cecilio, rilevato da Palladio e da Ligorio, composto di nove ambienti quadrati della stessa dimensione, con volte a crociera e pilastri di rinforzo collocati in corrispondenza degli angoli. Si veda CIPRIANI 2004, p. 23.

²⁵ Marco Vitruvio Pollione. *Dell'Architettura*, Libro secondo, Capitolo I, *Della prima Origine delle Fabbriche*, p.119 https://www.liberliber.it/mediateca/libri/v/vitruvius/l_architettura/pdf/vitruvius_l_architettura.pdf [consultato il 14-06-2021].

²⁶ CAIROLI GIULIANI 2011, pp.43-44.



1.1

FIG. 1.1 Basilica inferiore, parete del transetto nord, all'esterno dell'arco d'ingresso della cappella di San Nicola. Giotto raffigura il crollo di un edificio a seguito di un terremoto (foto dell'Autrice).



1.2

FIG.1.2 Nel 1308, Rimini fu interessata da un terremoto che impressionò gli artisti della scuola pittorica molto attiva in città in quegli anni, tanto da indurli a raffigurare negli affreschi della chiesa di S. Agostino la scena del "terremoto di Efeso" (Pietro da Rimini, XIV secolo).



1.3

FIG. 1.3 Portale dell'abbazia di Nonantola, nella cui iscrizione è citata la ricostruzione della chiesa dopo il terremoto che nel 1117 sconvolse la Pianura Padana. L'iscrizione latina recita «Le alte volte del tempio crollarono nel millescentodiciassettesimo anno dalla nascita del Redentore e quattro anni dopo si cominciò a ricostruirle». (foto dell'Autrice).



1.4

FIG. 1.4 Francesco di Giorgio Martini, *Terremoto di Siena del settembre 1467*, tempera su tavoletta di copertina dei registri della magistratura del Comune di Siena detta "delle Biccherne" conservata nell'Archivio di Stato di Siena.



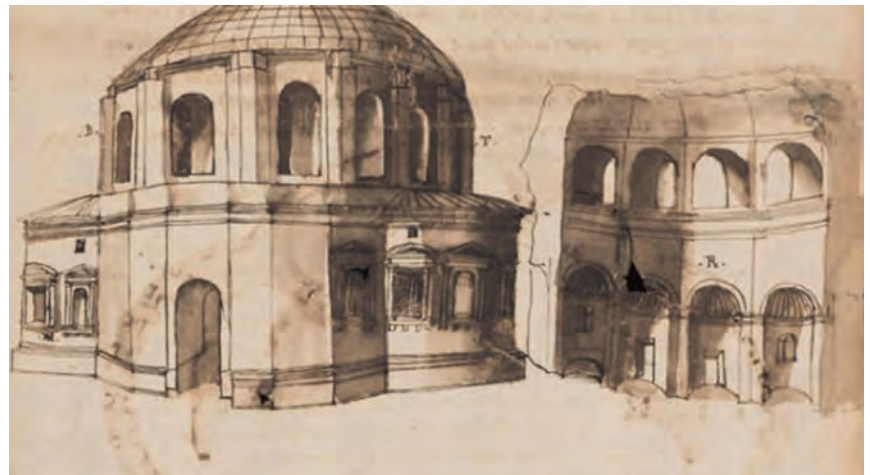
1.5

FIG. 1.5 Leonardo da Vinci, *Codice A* dell'Institut de France, ff. 51r-51v. Il primo disegno rappresenta gli archi capovolti a sostegno di fondazioni, forse nel tentativo di limitare il rischio di movimenti differenziali dei suoli o per contenere movimenti sismici; il secondo disegno raffigura uno schema di travatura per un edificio a difesa dei terremoti, con l'inserimento di travi per connettere l'edificio.



1.6

FIG. 1.6 H. J. Helden, *Ferrara distrutta dal terremoto del 1570*, conservata a Zurigo presso la Biblioteca Universitaria è tratta dall'articolo "Terremoti a Ferrara e nel suo territorio: un rischio sottovalutato", di Emanuela Guidoboni e Marco Folin, pubblicato su «Ferrara. Voci di una Città», Rivista semestrale di cultura, informazione e attualità della Fondazione Cassa di Risparmio di Ferrara.



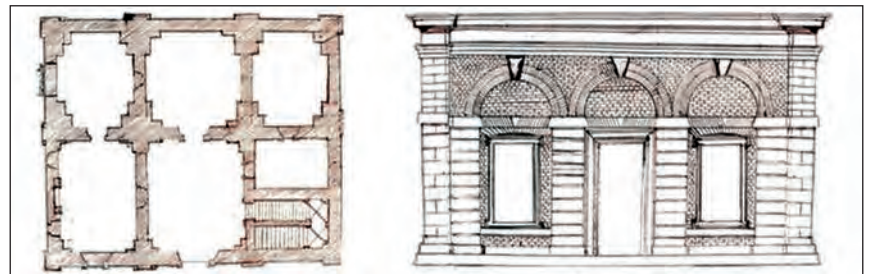
1.7

FIG. 1.7 Pirro Ligorio riconobbe nel Tempio di Minerva Medica un monumento di eccezionale importanza tra i più rappresentativi dell'Antichità Classica non solo da un punto di vista architettonico ma anche da un punto di vista storico e scientifico, perchè immaginò che fosse il centro della *Schola Medicorum*. Immagine tratta dal *Manoscritto sul Tempio di Minerva Medica*, conservato presso la Bodleian Library, Oxford, *Manoscritti Canonici Italiani*, n.138, fol. 26v.



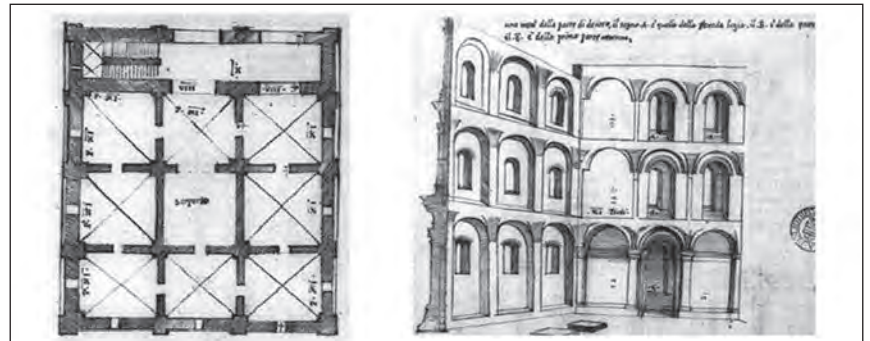
1.8

FIG. 1.8 Ian Campbell, *Pirro Ligorio's Oxford Album*, in *Pirro Ligorio's Worlds. Antiquarianism, Classical Erudition and the Visual Arts in the Late Renaissance*, «Brill's Studies in Intellectual History», vol. 293/34, pp. 255-272.



1.9

FIG. 1.9 Pirro Ligorio rappresenta in pianta e in alzato la prima casa capace di resistere ai terremoti nel 1570.



1.10

FIG. 1.10 Il progetto della casa antisismica si basa su una struttura regolare, simmetrica e con le masse dell'edificio controllate. AST, *Libro dei diversi terremoti*, Codice 28 - Ja.II.15, f. 59v.

4.3. L'interpretazione dei caratteri costruttivi negli edifici nel centro storico di Camerino

I centri storici marchigiani, soprattutto quelli collocati nelle aree interne fin dall'antichità sono stati interessati da complesse dinamiche legate ad accadimenti improvvisi, prevalentemente a seguito di grandi catastrofi di origine naturale. Durante l'ultimo secolo si sono sviluppati eventi di grande portata che hanno provocato o contribuito allo spopolamento e all'abbandono. In tale panorama ampio e complesso si colloca il caso paradigmatico di Camerino.

Il centro storico di Camerino si trova a quota 660 m sul livello del mare, in particolare su una propaggine orientale della dorsale Appenninica. Presenta una tipica forma allungata, in relazione al suo substrato roccioso in arenaria che in alcuni punti è affiorante e si confonde con il materiale lapideo lavorato, con cui sono realizzati gli edifici più antichi. Antichissimo insediamento degli Umbri Camerti, la Città ha un ruolo rilevante già in età romana fino a diventare con Carlo Magno capoluogo dell'omonima Marca. Nel 1259 è distrutta dai ghibellini. Gentile da Varano ne promuove e organizza la ricostruzione, stabilendovi la sede della sua dinastia. Durante il periodo della Signoria la città raggiunge una ragguardevole prosperità economica ed un notevole incremento demografico, congiunti ad una trasformazione urbanistica che in parte ne modifica l'impianto medievale.

Le trasformazioni del sistema costruttivo nel tempo sono state attuate attraverso sopraelevazioni, accorpamenti, riorganizzazione della forometria, modifiche nella consistenza della compagine strutturale. Le contingenze legate alle numerose ricostruzioni e agli adeguamenti tipologici e formali imposti dalle dinamiche sociali ed economiche, hanno comportato una progressiva degenerazione della compagine muraria. Gli elementi portanti risultano carenti in termini di monoliticità, per la rifusione di cellule edilizie medievali e rinascimentali in organismi estremamente eterogenei e complessi⁴⁴.

Gli edifici di Camerino dopo i frequenti terremoti e soprattutto dopo le sequenze del XVIII secolo sono stati riparati, confermando la trama urbana precedente ma attivando ulteriori processi di stratificazione/trasformazione delle costruzioni⁴⁵. Le operazioni di rifusione delle cellule edilizie medievali, attuate in passato attraverso l'adeguamento e la riqualificazione estetica delle fabbriche, si sono confrontate sia con la frammentazione della proprietà, sia con l'urgenza della ricostruzione.

Il terremoto del 2016 e la conseguente complessa ricostruzione hanno coinvolto un patrimonio edilizio concentrato in prevalenza all'interno del centro storico. Una trama di emergenze architettoniche – edifici di culto, palazzi signorili e edilizia civile – nella quale convivono sistemi strutturali, orizzontamenti e presidi antisismici di diversa natura; tale insieme di elementi spesso non collegati fra loro, sfugge a qualsiasi classificazione statica e inquadramento strutturale.

Il centro storico appare integro nella sua coralità e solo in alcuni casi rivela chiare interruzioni o mancanze volumetriche dell'edificato, ma cela, in realtà, collassi parziali, cedimenti localizzati e deformazioni denunciati da evidenti diastasi tra corpi di fabbrica fusi tra loro, ma non opportunamente ammorsati e vuoti strutturali conseguenti al passaggio di canne fumarie e all'apertura di vani accessori e canali di servizio relativi alle numerose fasi di adeguamento tipologico e formale nel tempo. I crolli sono limitati ad alcune porzioni murarie, le cui caratteristiche sono state in precedenza indagate.

Si rileva la natura promiscua delle strutture portanti nelle quali convivono apparecchi irregolari realizzati in pezzame minuto, scarsamente lavorato e legato con abbondante malta di modesta qualità e cantonali, angolate, mostre e profili a sesto acuto di porte e finestre appartenenti a brani di muratura medievale, recuperati e adattati come base della nuova edificazione. L'architettura camerte che si basa su impianti e tracciati antichi, è il frutto di ricostruzioni premoderne e moderne, attuate in larga misura dopo il terremoto del 1799, che impongono un'organizzazione differente: i fronti, sono riorganizzati attraverso nuove bucature realizzate in breccia, tamponature, innesti e sovrapposizioni che compromettono omogeneità e solidità delle strutture, restituendo un ordine solo apparente in occasione degli ultimi eventi sismici.

La vulnerabilità del costruito è chiaramente legata al perdurare di modalità insediative e tecniche costruttive, con l'obiettivo di rinnovare un impianto attraverso processi di trasformazione del tessuto edilizio racchiuso entro le mura. Per questa ragione, viene approfondito il comportamento del sistema edilizio in aggregato che, rispetto alle fabbriche isolate, ha un comportamento particolare, legato all'accostamento di differenti corpi di fabbrica che

⁴⁴ FALASCHI 2003, pp.19-42; LILLI 1652, p.67.

⁴⁵ BOCCANERA 1971, p.2.

interagiscono fra loro. Lo studio dell'aggregato edilizio, o di una sua singola Unità Strutturale (US), avverrà con le medesime procedure:

- esecuzione di indagini diagnostiche a conferma delle ipotesi iniziali;
- rilevamento quadri fessurativi;
- valutazione qualità della tessitura muraria;
- valutazione delle vulnerabilità delle pareti fuori dal piano e modalità di trasmissione delle azioni sismiche longitudinali alle pareti costituenti le facciate dell'aggregato.

Per garantire la sicurezza sismica degli aggregati è molto importante studiare il ruolo dei presidi antisismici preesistenti, frutto di precedenti interventi di miglioramento sismico, che collaborano al comportamento dinamico dell'aggregato.

Allo stato attuale, l'edificato nel centro storico di Camerino si può suddividere nelle seguenti categorie:

- a) Edifici di impianto medioevale che conservano prevalentemente i caratteri originari, distinti in sottoclassi a seconda dell'impianto tipologico unitario o seriale;
- b) Edifici di formazione rinascimentale o medioevale ma trasformati in epoca rinascimentale o post-rinascimentale in cui le trasformazioni abbiano assunto carattere prevalente rispetto ai caratteri originari, distinti in sottoclassi a seconda dell'impianto tipologico;
- c) Edifici ottocenteschi o in cui sia prevalente la trasformazione subita post-terremoto del 1799, distinti in sottoclassi a seconda dell'impianto tipologico prevalente;
- d) Edifici novecenteschi di sostituzione del tessuto originario.

La città murata dopo il 1380 era divisa in tre terzi:

1. "Sossanta" (sotto il Duomo) si estendeva dal Duomo a San Venanzio;
2. "Mezzo" abbracciava il Centro;
3. "Muralto" comprendeva la parte sud e l'estremità ovest.

Sulla base delle caratteristiche omogenee dell'edificato e del loro sviluppo storico, il centro storico è stato suddiviso in 6 diverse zone omogenee per una descrizione più dettagliata.

Zona 1

La zona 1 è situata a sud-est di Camerino, al di fuori delle mura della città e al limite dell'area del Centro Storico. La zona corrisponde all'antico Borgo S. Anna, dal nome della chiesa, unico edificio di culto presente in quest'area. È un nucleo indipendente dal resto della città, con caratteristiche storiche, tipologiche e costruttive omogenee. Se si escludono alcuni manufatti recenti e di struttura in c.a., l'insieme è costituito da edifici a schiera di due o tre piani di muratura di blocchi sbozzati di pietra arenaria (spesso con listature di mattoni) con solai e tetti di legno. Le dimensioni delle cellule elementari mediamente hanno luce netta di circa m. 6x6. Sono frequenti anche cellule di forma rettangolare di 4-6 m frontali e 10 m circa di profondità e cellule di 8x8 o 9x9 m circa con un pilastro murario di sostegno delle travi di legno dei solai e dei tetti. I solai sono a doppia orditura; i tetti ad una o a due falde o a padiglione. Le travi principali dei solai e dei tetti sono in genere parallele alla facciata.

Zona 2

Questa zona corrisponde a quello che era il terziere di Muralto. Qui, intorno ad alcuni edifici specialistici, l'edificato minore si è sviluppato tra orti e cortili costituito da botteghe artigiane con tipologia in linea su "lotto gotico". L'impianto morfologico attuale suggerisce che la Rocca BORGESCA con il Convento delle Benedettine di San Salvatore (XVI sec.) e il Convento e Chiesa di S. Elisabetta (XIV sec.) abbiano generato due percorsi matrice costituiti a monte da Via Pieragostino, Largo Feliciangeli e Via Varino Favorino e a valle da Via Morrotto e Via Costanza da Varano, congiunti in Largo Pierbenedetti. Ai margini del "percorso matrice" si sono disposti nei secoli gli edifici privati occupando, con uno sviluppo per lo più ortogonale, lo stretto spazio tra le mura e la strada. La trama urbana risulta piuttosto caotica, costituita da un insieme disomogeneo di edifici realizzati con strutture e tipologie edilizie diverse. La maggior parte è costituita da edifici da 2 a 4 piani con struttura portante in muratura (blocchi di arenaria con ricorsi in laterizio, solai e copertura in legno o c.a.), ma sono da segnalare edifici volumetricamente consistenti realizzati con struttura portante in c.a. o mista.

Lo schema strutturale per gli edifici in muratura è quello caratteristico della tipologia a schiera con cellule delle dimensioni tra 4 a 6 m. sul fronte strada e 10-12 m. in profondità. Generalmente, l'orizzontamento è costituito

da solai in legno tradizionali con orditura principale, secondaria e pianelle. In corrispondenza degli interventi più recenti, alcuni solai lignei sono stati sostituiti.

Zona 3

La zona 3 si sviluppa lungo il tracciato delle mura storiche, nella parte sud-occidentale. L'area comprende gran parte del terziere Muralto. Tra gli edifici pubblici sono numerose le importanti testimonianze di diverse epoche storiche: l'ex chiesa di S. Francesco, con la sua struttura romanico-gotica, rappresenta un esempio di architettura del periodo medievale di particolare pregio; al XV secolo appartiene anche il palazzo Riccioni, il quale, pur essendo stato notevolmente rimaneggiato nel corso del tempo, conserva ancora, nel cortile, preziose tracce dell'organismo originario; nel 1503 fu realizzata la Rocca del Valentino, su disegno di Lodovico Clodio, rafforzata poi da Giovanni Maria Da Varano, restaurata da Guidobaldo Della Rovere, poi dai Farnese e dalla Chiesa; esempi barocchi sono la chiesa di S. Filippo, terminata nel 1735, e S. Maria in Via, iniziata nel 1639 da Andrea Sacchi, con alta facciata in cotto a due ordini. Tra gli edifici emerge per valore storico l'Ospedale di S. Maria della Pietà costruito intorno al 1470 da Giulio Cesare da Varano in sostituzione dei vari piccoli ospizi sparsi nella città. Il vicino Palazzo delle Esposte fu progettato sul finire del Settecento da Mattia Capponi inglobando parte dell'antico edificio nel nuovo con il tamponamento delle arcate del loggiato d'ingresso.

Nel corso del Novecento, alcune porzioni del tessuto antico sono state demolite per costruire alcuni edifici pubblici, fra cui l'ampliamento dell'ex-ospedale in Via Muralto e gli edifici universitari di Via Scalzino. La zona è caratterizzata dalla presenza di importanti palazzi privati che derivano dall'accorpamento di più cellule medioevali. I palazzi hanno un'altezza di quattro o cinque piani; androni e scale voltate, per raggiungere il "piano nobile", anch'esso con volte di mattoni in foglio o in camorcanna, in alcuni casi affrescate.

L'edilizia minuta del tessuto medioevale presenta invece una tipologia caratterizzata da ambienti decisamente più modesti.

Zona 4

Si tratta di una zona posta nella parte più antica e ha caratteristiche di omogeneità dal punto di vista urbanistico e morfologico; essa è delimitata a nord-est dalla Piazza Cavour e dal fianco medioevale del quadriportico "Varano" del Palazzo Ducale; a sud-est dalla cinta muraria e dal Parco delle Mura; a sud-ovest dal quartiere del vecchio ospedale e dalla Chiesa di S. Maria in Via; a nord ovest dagli antichi tracciati delle Vie Vergelli e Bongiovanni.

L'area è caratterizzata da un supporto pianeggiante nella parte centrale (detta "la piana"), e da un forte declivio del terreno verso l'arco sud-est, in direzione della cinta muraria sud-ovest. Essa giace su uno sperone roccioso in pietra arenaria, costituitosi verso la fine dell'epoca miocenica, che, a causa della sua friabilità, si presenta ricca di grotte, caverne, gallerie naturali.

La "forma" pressoché definitiva del tessuto planimetrico si consolida dopo le distruzioni apportate dal sacco svevo (1259) e dal terremoto del 1279. Con la ripresa dell'agricoltura, il ripopolamento dell'abitato e la zona si arricchisce di costruzioni medioevali a schiera o a doppia schiera orientate in senso ortogonale agli assi viari e all'Arengo, delimitando una vasta area centrale. Trasversalmente alle vie ed agli spazi pubblici, il tessuto medioevale si ramificava in una serie di passaggi pedonali, alcuni in forte pendio, che ancor oggi conservano i toponimi delle corporazioni che vi risiedevano.

Il Ghetto ebraico costituisce un'eccezione a questo impianto regolare; la sua costruzione si sviluppa presumibilmente in due fasi: una prima (1343) caratterizzata da un'edilizia a due o tre piani che si affaccia su strette e tortuose vie (che creano, con il loro andamento irregolare, piccole piazze e spazi fra loro collegati; ed un secondo nucleo che sarà delimitato dalla Via Bongiovanni: sono edifici in linea o a schiera alcuni dei quali, in seguito, oggetto di radicali trasformazioni. La struttura dei nuclei medievali si definisce durante la signoria di Giulio Cesare Da Varano, quando, resi sicuri i confini del Ducato, i Varano poterono dedicarsi alla costruzione della città.

Dal punto di vista viario occorre sottolineare lo sdoppiamento dell'asse longitudinale nelle due nuove strade prossime alla cinta muraria: la Via Favorino e le Vie Vergelli e Bongiovanni e il delinearsi della Via Seneca oggi Via Ugo Betti posta fra l'edilizia a schiera in fase di costruzione lungo la cinta muraria alle spalle di Via Favorino. Dopo il sisma del 1799 un'ennesima trasformazione riguarderà nuovamente la struttura degli edifici medioevali e la creazione di nuove tipologie nella forma del Palazzo derivanti dall'accorpamento di più unità abitative medioevali o, in altri casi, la semplice demolizione con sostituzione di nuove strutture funzionali: singoli edifici medioevali vengono accorpati a formare nuovi palazzi tramite l'introduzione di corpi scala per collegare i diversi livelli; vengono realizzati androni d'accesso spesso voltati, filtro fra la strada e la corte retrostante o di collegamento fra due strade. I fronti degli edifici vengono riparati con l'inserimento di parti in laterizio, rinnovate totalmente; in alcuni casi i partiti murari medievali vengono ringrossati con uno strato di mattoni rifinito ad intonaco. Le riprese murarie mostrano connessioni precarie sia con le preesistenti murature, sia con i maschi murari. Per garantire un collegamento si fa

ricorso alle catene mentre ai piani terreni è rilevante l'intervento di ristrutturazione per creare botteghe e negozi con il risultato di un grave indebolimento alla base dei setti e conseguente vulnerabilità degli edifici, operazione aggravata da ampie aperture praticate nella muratura antica.

Gli interventi novecenteschi sono essenzialmente di sostituzione del tessuto edilizio medioevale.

Dall'osservazione diretta degli edifici all'interno del centro storico, si rilevano alcuni interessanti interventi che possiamo definire "antisismici". Fra questi, si nota un miglioramento dei magisteri costruttivi con il conseguimento della planarità dei corsi, ottenuta attraverso l'uso di filari in mattoni, l'accrescimento del numero degli elementi trasversali (diatoni), le connessioni angolari e fra i muri di spina e un generale miglioramento delle apparecchiature come testimoniato dalle analisi effettuate su alcuni campioni murari.

Con il passare dei secoli, l'uso frequente dei laterizi per risarcire i danni, ha prodotto un gioco di equilibrio arenaria-mattone su tutta l'edilizia camerata. Il problema principale della conservazione dell'architettura in questa zona, oltre ai danni sismici, sono gli agenti atmosferici, i quali inducono processi di recessione del materiale lapideo, particolarmente fragile. Sulla pietra di Camerino, si era già espresso Francesco Rodolico che ne aveva analizzato le caratteristiche, affermando che «nelle Marche, sono largamente diffuse le arenarie, spesso gelive e anche di cattiva qualità come a Camerino»⁴⁶. Pertanto, in molti casi, l'intonaco si impone come salvaguardia, lasciando a vista la pietra solo nei portali, zoccolature, capitelli o cornici di porte e finestrate. Lo stato di abbandono in cui versa il centro storico ha causato ulteriori processi di degrado sia degli intonaci sia della pietra⁴⁷.

Dall'analisi dei sistemi costruttivi presenti nel centro storico, si rileva l'utilizzo di alcuni presidi antisismici; emerge un quadro articolato di soluzioni, adottate in vari periodi, sia nell'edilizia più rappresentativa, sia in quella "minore", aggettivo improprio, non corrispondente alle reali caratteristiche del costruito diffuso e particolarmente stratificato. L'organismo architettonico in muratura tende, se sottoposto a sollecitazioni di natura sismica, a comportarsi seguendo modalità di deformazioni duttili. Sul suo comportamento influiscono in maniera significativa semplici ma efficienti accorgimenti costruttivi, frutto della lunga esperienza a contatto con i terremoti.

Di grande interesse, ad esempio, è il sistema di copertura ancora rilevabile su non pochi manufatti storici di Camerino, ma non solo, come mostra il caso delle capriate lignee del Palazzo Ducale. Si tratta di capriate montate non direttamente sulle murature ma su cuscinetti lignei che presentano la caratteristica, facilmente intuibile, di contribuire a contrastare le sollecitazioni a taglio che le travi di solai lignei o le capriate devono sopportare, offrendo considerevoli aumenti della sezione resistente, nel punto dove lo sforzo di taglio assume i valori massimi, ovvero, in prossimità degli appoggi.

Altri interventi hanno riguardato la realizzazione di rinforzi delle sezioni, sostituendo nei paramenti i blocchi lapidei degradati con nuovi elementi più resistenti. Talvolta l'intervento serviva a ristabilire la verticalità della muratura strapiombata, mediante la foderatura del lato sporgente. In entrambi i casi la validità dell'intervento era connessa all'efficacia dell'ammorsamento rispetto alla fabbrica originaria. Alcuni interessanti interventi sono stati realizzati nel Palazzo Ducale, sperimentando le capacità di resistenza dei rinforzi strutturali localizzati agli eventi sismici.

Nel 1762 ad opera dell'architetto Camerale Carlo Marchionni⁴⁸, si consolida la struttura dell'edificio, attraverso la messa in opera di catene nei sotterranei, la costruzione di uno sperone su vicolo della Salara e la formazione di pilastri e sott'archi nel cortile maggiore, che inglobano completamente le colonne in pietra arenaria di epoca rinascimentale. Quest'operazione così invasiva permette alla struttura di rimanere intatta a seguito della serie sismica del XVIII secolo e in particolare dopo il sisma che ha interessato Camerino nel 1799.

Il risultato di questo intervento viene mostrato in un inventario redatto il 6 ottobre 1789 in cui si legge

«Fu poi visitato il Cortile grande di detto Palazzo, che fa la figura di quadro, e vi è il suo portico, che gira attorno, che una volta era recinto di 14 Colonne di pietra saliccia, presentemente si trovano foderate di mattoni in quadro con suoi pilastri e contropilastri, archi, capitelli, e architravi, ed il pavimento, o sia selciata del medesimo si trova in pessimo stato, tanto che l'acque, che cadono in detto cortile non entrano più nel condotto, ma penetrano e si dilatano per li muri delli sotterranei sottoposti a detto cortile, onde è necessario selciarlo con mattoni a stagno calcestruzzo sotto ben murato, nel rigianco delle volte, essendo dette cortile e della lunghezza di palmi novantaquattro, e della larghezza di palmi settantasei. Le volte reali, che sono intorno al loggiato di detto Cortile hanno undeci chiavi di ferro nell'impostature delle medesime; la porzione poi di dette volte fatte a cammorcanna si trova in buon stato, come pure i scialpi delli muri, e le selciate e sopramattonati di detto Loggiato bisogna in parte riattarli, ed in parte rifarli da nuovo. ... Dirimpetto ad una delle Logge verso la Salara nel

⁴⁶ RODOLICO 1953, p.323; PETRUCCI, ROSELLI 2022, p.136.

⁴⁷ PETRUCCI, BARCHETTA 2022, pp. 401-414.

⁴⁸ CARLO MARCHIONNI o *Marchionne*, *Marchioni* (Roma, 10 febbraio 1702 - Roma, 28 luglio 1786). Numerosi studi hanno affrontato la figura di Marchionni e la sua poliedrica attività che spazia. Qui possiamo apprezzare il suo apporto al restauro degli edifici attraverso l'uso di metodi empirici efficaci alla risoluzione delle specifiche problematiche strutturali emerse nel palazzo ducale di Camerino.

muro principale dove resta il Portone dell'ingresso vi era una porticella, che esce alla strada vicino alla Salara sudetta con quattro scalini, quattro gangani, e quattro bandelle con suo ferro al di dentro in buono stato. In una nicchia del Portico di detto Cortile vicino alla Salara vi è la rimessa provvisoria, dove vi era una porta vecchia con tre fodere per parte, quattro gangani, e quattro bandelle con catenaccio piano, serratura e chiave»⁴⁹.

L'impiego di speroni, contrafforti o di archi rampanti è particolarmente diffuso e viene utilizzato per contrastare le spinte esercitate da archi e volte o dai fuori piombo dei muri dovuti agli effetti del sisma; gli speroni potevano anche essere collocati in corrispondenza dei cantonali, per irrigidire i fronti liberi e migliorare la connessione tra le pareti. La riuscita dell'intervento dipendeva, oltre che dall'efficacia dell'azione di contrasto anche dall'efficiente ammortatura alla fabbrica preesistente.

Un intervento simile a quello ideato da Marchionni per il loggiato del Palazzo Ducale viene proposto a Jesi, nel Palazzo Ricci ad opera di Mattia e Isidoro Capponi. I lavori consistono nel rinforzo dei pilastri con una foderatura di mattoni e nella realizzazione di una sorta di centinatura interna agli archi, che avrebbe dovuto sostenere in maniera stabile il peso delle strutture superiori⁵⁰. Altri interventi rilevabili negli edifici del centro storico di Camerino riguardano la ricucitura delle lesioni o sbrecciature con il sistema "cuci scuci", per ripristinare l'originaria continuità e resistenza della muratura. Tale sistema consisteva nell'asportazione di elementi compromessi intorno alle fenditure e nel successivo riempimento della breccia con un'apparecchiatura in filari di mattoni posti in opera con estrema cura. Per dissesti lievi si provvedeva più semplicemente a serrare le lesioni con zeppe lapidee, risarcendole con malta che poteva essere anche di gesso per le note proprietà espansive, previa scarificazione e bagnatura della lesione in profondità⁵¹. Su alcuni fronti, si nota la modifica delle aperture mediante tamponamenti con murature ben apparecchiate per rinforzare l'ossatura muraria, indebolita dai numerosi fori praticati nel tempo per esigenze d'uso⁵².

Venivano, di frequente, realizzati tra edifici prospicienti archi esterni di sbatacchio, in modo da puntellarle e contrastare l'eventuale movimento di ribaltamento delle pareti. Tale pratica però non sempre risultava efficace e talvolta si rilevava addirittura controproducente, poiché l'interconnessione tra edifici contigui, se non opportunamente calibrata in caso di sismi molto intensi, poteva provocare pericolose interrelazioni fra i differenti corpi di fabbrica⁵³.

Si riscontra diffusamente la pratica di introdurre i tiranti sia per consentire che la fabbrica sviluppi un comportamento scatolare, sia per assorbire le spinte degli archi, sia per collegare i solai nei punti di appoggio con le mura perimetrali. Il fissaggio dei tiranti è assicurato da vari sistemi, con piastre di differenti tipologie, soprattutto dopo gli interventi effettuati a seguito degli eventi sismici del 1997⁵⁴.

I danni occorsi a seguito del terremoto del 2016 nel centro storico di Camerino hanno richiesto un'approfondita analisi, per raggiungere un accettabile "Livello di Conoscenza" almeno pari a I secondo la vigente normativa.

⁴⁹ ASR, Camerale III, Miscellanea, *Inventario della Tesoreria di Camerino*, fol.17.

⁵⁰ PETRUCCI, DI LORENZO 2015-2016, pp.244-253; MONTIRONI 2009, pp. 260-266. Isidoro Capponi, con questo intervento, dimostra una capacità di analizzare le problematiche strutturali delle fabbriche antiche, operando puntuali inserimenti di rinforzo, studiati in funzione del caso specifico, con una volontà di far leggere con evidenza l'intervento di consolidamento, in termini formali e materici. Nel 1782 Mattia Capponi rinforza le strutture preesistenti del loggiato d'ingresso dell'Ospedale degli Innocenti attraverso setti portanti e realizza rinforzi in muratura in corrispondenza del fianco sinistro, intervento che presenta molti punti di vicinanza con l'intervento attuato nel loggiato del palazzo comunale di Jesi.

⁵¹ ROCCHI p. A132. Joseph-Antoine Borgnis nel suo *Traité élémentaire de construction appliquée à l'architecture civile* (1823), in merito alla rigenerazione della muratura lesionata affermava che «la prima operazione da fare è eliminare dalle fessure le parti distaccate e scarnire profondamente i giunti della muratura con un raschietto in ferro; poi si lavava con acqua e si iniettava la malta in grande quantità all'interno delle fessure; battendo sulla muratura, la malta penetrava fino a riempire le cavità».

⁵² Si potevano in tal modo distribuire i carichi su una superficie maggiore, diminuendo di conseguenza la tensione unitaria.

⁵³ Questo provvedimento venne espressamente vietato dal R.D. 18 aprile 1909 n. 19341, recante norme tecniche ed igieniche obbligatorie per le riparazioni, ricostruzioni e nuove costruzioni degli edifici pubblici e privati nei luoghi colpiti dal terremoto del 28 dicembre 1908 e da altri precedenti elencati nel R.D. 15 aprile 1909. All'art.34 si stabilisce che «È vietato l'impiego di archi di muratura per puntellamento o collegamento di muri».



⁵⁴ Dopo il sisma del 1997, per analizzare la distribuzione degli eventi sismici, catalogarli e selezionarli ai fini del finanziamento degli interventi, è stato utilizzato il metodo di Keefer per costruire una zonazione. Gli eventi censiti sono suddivisi in due fasce: 1) quelli ricadenti all'interno delle distanze formulate dalle curve di Keefer, dove si assume una diretta relazione tra dissesti idrogeologici (nuovi o aggravamenti di dissesti preesistenti) e crisi sismica; 2) quelli ricadenti all'esterno delle curve, dove tale relazione è più difficilmente sostenibile.

Tenuto conto di questa classificazione in relazione al rischio sismico, la ricostruzione si è orientata verso la conservazione dell'identità storico-ambientale e dell'integrità urbanistico-architettonica originale, secondo tre categorie di interventi:

- ricostruzione leggera negli edifici con livello di danneggiamento e vulnerabilità entro limiti stabiliti dalla normativa regionale e presenza di almeno una abitazione principale occupata al momento del sisma e dichiarata inagibile;
- ricostruzione pesante negli edifici isolati gravemente danneggiati situati all'esterno dei Programmi Integrati di Recupero (Pir);
- ricostruzione integrata attraverso i Pir dei centri e nuclei di particolare interesse storico, paesaggistico ed economico, dove gli edifici distrutti o gravemente danneggiati superavano il 40% del patrimonio edilizio.

Occorre sottolineare, come per la maggior parte degli edifici, sia stata adottata una strategia d'intervento orientata al miglioramento sismico in un'ottica di salvaguardia dei caratteri costruttivi locali. Questo *modus operandi*, in alcuni casi, non si è rivelato efficace, vista anche l'intensità raggiunta durante gli eventi 2016-2017.

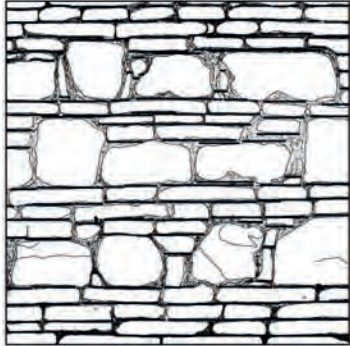

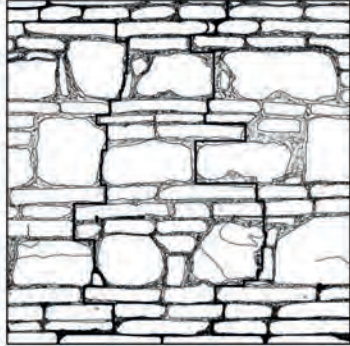
PARTE 2 – Rilievo della tipologia del muro: *a. geometria del pannello;*
b. caratterizzazione dei materiali del pannello e della sezione;
c. caratteristiche della malta di allettamento.

PARTE SECONDA RILIEVO DELLA TIPOLOGIA MURARIA	
2. TESSITURA DEL PARAMENTO FOTOGRAFIA DEL PARAMENTO 	RESTITUZIONE GRAFICA DEL PARAMENTO 

SCHEDA 4.2A. Scheda di rilevazione dell'Indice di Qualità Muraria. Individuazione della tipologia muraria.

PARTE SECONDA RILIEVO DELLA TIPOLOGIA MURARIA			
2. TESSITURA DEL PARAMENTO			
2.1 RUOLO STRUTTURALE			
<input checked="" type="checkbox"/>	MURATURA ESTERNA		
<input type="checkbox"/>	ALTRO		
2.2 TIPOLOGIA			
<input checked="" type="checkbox"/>	IN PIETRA		
<input checked="" type="checkbox"/>	IN MATTONI		
<input type="checkbox"/>	IN MATTONI SEMIPIENI (<45%)		
<input type="checkbox"/>	IN MATTONI FORATI (>45%)		
<input type="checkbox"/>	IN BLOCCHI DI TUFO		
<input type="checkbox"/>	MISTA		
<input type="checkbox"/>	ALTRO		
2.3 RICORSI			
<input type="checkbox"/>	PRESENTI DISTANZA	cm	
<input type="checkbox"/>	PRESENTI DISTANZA VARIABILE		
<input type="checkbox"/>	PRESENTI IN ALTRO MATERIALE		
<input checked="" type="checkbox"/>	PRESENTI IN MATTONI		
<input type="checkbox"/>	PRESENTI IN CLS		
<input type="checkbox"/>	ASSENTI		
2.4 ORIZZONTAMENTI/LISTATURE			
<input type="checkbox"/>	ASSENTI		
<input checked="" type="checkbox"/>	PRESENTI ogni	19 cm	
2.5 ZEPPE			
<input type="checkbox"/>	ASSENTI		
<input checked="" type="checkbox"/>	PRESENTI IN COTTO		
<input type="checkbox"/>	PRESENTI IN PIETRA		
2.6 APPARECCHIATURA/ORIZZONTALITÀ DEI FILARI			
<input type="checkbox"/>	IRREGOLARE (O.R. NR)		
<input checked="" type="checkbox"/>	A CORSI-SUBORIZZONTALI (OR. PR)		
<input type="checkbox"/>	A CORSI ORIZZONTALI (OR. R)		
2.7 SFALSAMENTO DEI GIUNTI VERTICALI			
<input type="checkbox"/>	NON RISPETTATO (SG. NR)		
<input checked="" type="checkbox"/>	PARZIALMENTE RISPETTATO (SG. PR)		
<input type="checkbox"/>	RISPETTATO (SG. R)		
2.8 PRESENZA DI DIATONI			
<input type="checkbox"/>	NON RISPETTATO (PD. NR)		
<input checked="" type="checkbox"/>	PARZIALMENTE RISPETTATO (PD. PR)		
<input type="checkbox"/>	RISPETTATO (PD. R)		
		PUNTEGGIO	
		VERTICALE	COMPLANARE
		1	0,5
		PUNTEGGIO	
		VERTICALE	COMPLANARE
		0,5	1
		PUNTEGGIO	
		VERTICALE	COMPLANARE
		1	1,5

SCHEDA 4.3A. Scheda di rilevazione dell'Indice di Qualità Muraria. Tessitura del paramento murario.

PARTE SECONDA RILIEVO DELLA TIPOLOGIA MURARIA		
2. TESSITURA DEL PARAMENTO ORIZZONTALITÀ DEI FILARI Schema grafico 	SFALSAMENTO DEI GIUNTI Schema grafico 	INGRANAMENTO SUL PIANO ESTERNO Schema grafico 
		VALORE DI LMIT: 158 cm INGRANAMENTO: ELEVATO VULNERABILITÀ: LV4 - VUL. LIMITATA

SCHEDA 4.4A. Scheda di rilevazione dell'Indice di Qualità Muraria. Orizzontalità dei ricorsi, sfalsamento dei giunti e ingranamento sul piano esterno.

specifica muratura. L'elemento da osservare è il singolo pannello murario. La sua qualità muraria viene valutata separatamente per le tre possibili diverse tipologie di azioni: carichi verticali, azioni orizzontali che sollecitano il pannello murario nel suo piano medio, azioni che sollecitano il pannello murario ortogonalmente al piano medio. I parametri della "regola dell'arte" influenzano in maniera diversa la risposta del muro ai differenti tipi di azione sollecitante e per tale motivo appare corretto considerare separatamente i tre casi, ottenendo quindi tre diversi valori: IQM verticale, IQM nel piano, IQM ortogonale al piano.

Per attribuire un giudizio sulla qualità della muratura occorre quindi valutare in che misura siano rispettati i sette parametri e caratterizzanti la "regola dell'arte". Per "regola dell'arte" s'intende l'insieme di quegli accorgimenti costruttivi che garantiscono il buon comportamento dell'elemento murario e ne assicurano compattezza e monoliticità. Gli accorgimenti costruttivi presi in considerazione sono identificati nella scheda della qualità muraria:

- **(MA.) Malta di buona qualità / efficace contatto fra elementi / zeppe.** Il contatto fra gli elementi, necessario per trasmettere e ripartire le azioni fra le pietre in maniera uniforme e per trasmettere le forze fino al terreno, si ottiene o per contatto diretto fra elementi squadrati o in caso di muri irregolari con malta degradata, grazie a pietre di dimensioni minori inserite nei vuoti, le cosiddette "zeppe". La malta, oltre a regolarizzare il contatto tra le pietre, se di buona qualità, può assicurare anche una certa resistenza di natura coesiva alla muratura;
- **(P.D.) Ingranamento trasversale / presenza di diatoni.** Questo requisito impedisce la separazione della parete in più paramenti costruiti l'uno a ridosso dell'altro e permette la distribuzione del carico su tutto lo spessore del muro anche in quei casi in cui il carico è gravante sul bordo della parete. Il requisito può essere soddisfatto grazie ai diatoni, ossia pietre passanti attraverso lo spessore della parete. Ugualmente efficaci sono le connessioni trasversali con elementi laterizi o di pietra non completamente passanti ma in grado di interessare gran parte dello spessore della parete ed ingranati fra loro (semidiatoni);
- **(F.E.L.) Forma degli elementi.** La presenza di due facce orizzontali sufficientemente piane, come avviene con elementi di forma squadrata, assicura la mobilitazione delle forze d'attrito, cui si deve gran parte della capacità di una parete di resistere a sollecitazioni orizzontali ad essa complanari. Infatti, l'attrito si sviluppa principalmente sotto l'effetto della forza peso della muratura sovrastante la superficie di scorrimento ed è massima quando le superfici di scorrimento sono ortogonali alla forza peso;
- **(D.E.L.) Dimensione degli elementi.** Elementi resistenti di dimensioni rilevanti rispetto allo spessore del muro assicurano un buon grado di monoliticità della parete. Inoltre, proprio per la loro dimensione, risultano spesso ben ingranati fra loro.
- **(S.G.) Sfalsamento fra i giunti verticali.** Tale condizione, insieme alla forma squadrata delle pietre, permette "l'effetto catena" che fornisce una certa resistenza a trazione alla muratura. Inoltre, anche se le pietre non sono squadrate, se si hanno giunti regolarmente sfalsati si attiva un'altra risorsa resistente delle murature: il cosiddetto "effetto incastro" legato all'ingranamento nel piano della muratura fra gli elementi resistenti.
- **(OR.) Presenza di filari orizzontali.** Tale requisito induce una buona distribuzione dei carichi verticali data la regolarità della superficie di appoggio tra i vari elementi. Assume particolare importanza anche in occasione delle azioni sismiche, poiché consente l'oscillazione della parete attorno a cerniere cilindriche orizzontali, senza danneggiare la muratura. Anche i ricorsi orizzontali in mattoni (listature) producono un effetto simile, regolarizzando le murature più disordinate come quelle in pietre e ciottoli;
- **(R.E.L.) Resistenza adeguata degli elementi.** Questo requisito vuole tenere conto di tre possibili situazioni negative: elementi intrinsecamente deboli; laterizi fortemente forati; elementi interessati da patologie di degrado materico legate all'esposizione delle superfici lapidee o laterizie ma anche alle caratteristiche intrinseche dei materiali utilizzati.

Solo dopo questa operazione preliminare è possibile combinare tra loro i giudizi parziali, pervenendo così ad una valutazione sintetica complessiva. Per esprimere un giudizio sul rispetto di un dato elemento della "regola dell'arte" bisogna conoscere la tipologia muraria che si sta valutando e quindi occorre osservare e rilevare attraverso fotografia del campione e rilievo architettonico almeno alla scala 1:20. Per tenere poi conto, per ciascuno dei sette parametri considerati, di possibili situazioni intermedie tra il pieno rispetto e il non rispetto della "regola" è stata introdotta una categoria di giudizio intermedia, denominata "parziale rispetto".

Il criterio seguito per differenziare l'importanza di ciascun parametro della "regola dell'arte" sul comportamento delle murature nei confronti dei tre tipi di azione consiste nell'attribuire ai sette parametri presi in considerazione, pesi differenti i cui valori numerici derivano dalle esperienze già condotte in altri ambiti. Il metodo proposto

conduce ad un indice numerico di qualità muraria (IQM) distinto in base alle tre possibili direzioni dell'azione sollecitante. Tramite l'osservazione dei paramenti e dove possibile della sezione muraria si valuta il grado di rispetto di ciascun parametro della regola dell'arte (R. = parametro rispettato; P.R. = parametro parzialmente rispettato; N.R. = parametro non rispettato). Attraverso tali valori si può classificare la muratura in esame in una "categoria" delle tre supposte possibili: A, B o C, avendo così un'indicazione sulla sua qualità meccanica. La muratura di categoria A ha un buon comportamento strutturale; una muratura di categoria B ha un comportamento di media qualità; una muratura in categoria C ha una risposta alle sollecitazioni insoddisfacente. Il metodo IQM non è solo di tipo qualitativo, in quanto attraverso le correlazioni che sono state osservate tra valori IQM e i principali parametri meccanici delle murature, sono possibili alcune applicazioni di tipo semi-quantitativo. Successivamente alla definizione del metodo, sono state esaminate le correlazioni fra i valori di IQM e i parametri meccanici da normativa, alla luce delle modifiche introdotte dalle NTC 2018 (MIT, 2018) con la relativa Circolare esplicativa (Cons. Sup. LL.PP., 2019)⁶¹. Le modifiche introdotte dalle NTC 2018 attraverso la Circolare esplicativa 2019 hanno comportato la necessità di un aggiornamento del metodo IQM. Tale Circolare ha modificato le modalità di determinazione dei parametri meccanici per le murature esistenti. Nella tabella C8.5.I, che riporta i valori di riferimento dei parametri meccanici delle murature, sono state introdotte alcune nuove tipologie e sono stati modificati i valori dei parametri di resistenza e dei moduli elastici. Viene inoltre introdotto un nuovo criterio di rottura a taglio, che prevede la conoscenza e l'utilizzo di un ulteriore parametro: la resistenza media tangenziale f_{V0} , relativa a tale modalità di rottura. Non sono cambiamenti trascurabili neppure l'introduzione, per le murature in mattoni, di un fattore moltiplicativo di resistenze e moduli e l'utilizzo di coefficienti riduttivi diversificati per resistenze e moduli per tutte quelle murature in cui la malta è di qualità molto scarsa.

Per ciò che riguarda la procedura per il calcolo dell'IQM sono le variazioni nelle espressioni analitiche delle curve di correlazione tra gli IQM ed i parametri meccanici delle murature ad aver subito le principali modifiche. Infatti, le tipologie murarie che si possono ricavare dalla Circolare 2019 sono aumentate in modo rilevante rispetto alla Circolare precedente (74 invece di 36); inoltre, alcuni dei parametri meccanici, viste le nuove limitazioni introdotte, risultano inferiori a quelli indicati dalle norme precedenti. La Circolare 2019 contiene alcune indicazioni che favoriscono l'utilizzo di metodologie come quella dell'IQM nel percorso progettuale o di valutazione della sicurezza⁶². Un altro riferimento all'uso di metodi speditivi per la valutazione della qualità muraria è indicato nella citata Circolare 2019, in relazione alle prove sperimentali utilizzate per la conoscenza della muratura: «A seguito delle indagini, è necessario valutare, per ogni prova, il grado di rappresentatività sia della classe tipologica attribuita al materiale, sia dei valori medi delle caratteristiche meccaniche dell'edificio da utilizzare nelle modellazioni. A questo scopo possono essere utili metodi che, avvalendosi della lettura visiva dei paramenti e della sezione, consentano di ottenere delle stime di tali caratteristiche attraverso indicatori di qualità»⁶³.

La rilevazione degli Indici di Qualità Muraria è stata applicata alle tipologie murarie prevalenti degli edifici di Camerino e ad una serie di sottocategorie, che mostrano alcune variazioni significative, ai fini della valutazione di un buon comportamento del sistema murario in termini di compattezza e monoliticità, facendo riferimento ai parametri che ne definiscono la forma, l'ingranamento, lo sfalsamento dei giunti e l'orizzontalità dei filari, oltre ad una buona capacità di allettamento delle malte. Dalla campionatura si rileva che rispetto alle azioni ortogonali al piano della parete, molte murature hanno un indice piuttosto basso, tale da causare un preoccupante comportamento in caso di sisma, come si è potuto rilevare dopo gli eventi del 2016.

L'analisi delle tecniche costruttive riferite al periodo storico di edificazione, la caratterizzazione tipologica delle murature, la conoscenza dei criteri e delle norme di progetto per gli interventi più recenti, hanno contribuito a definire il quadro complessivo della vulnerabilità degli edifici.

⁶¹ BORRI, DE MARIA 2009, Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica (RELUIS), Allegato 3b.1-UR06-4.

⁶² BORRI, DE MARIA 2019, pp.7-8. I comportamenti meccanici delle costruzioni e i valori delle resistenze da utilizzare nelle analisi sono correlati alle caratteristiche tipologiche e costruttive degli elementi murari.

⁶³ Nel paragrafo C8.5.3.1 della Circolare 2019 è scritto che «La muratura in una costruzione esistente è il risultato dell'assemblaggio di materiali diversi, in cui la tecnica costruttiva, le modalità di posa in opera, le caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti e il loro stato di conservazione, determinano il comportamento meccanico dell'insieme». Inoltre, per raggiungere un adeguato livello di conoscenza si possono predisporre «tre livelli di indagine, in relazione al loro grado di approfondimento: Indagini limitate: sono generalmente basate su ricognizioni di tipo visivo che, al rilievo geometrico delle superfici esterne degli elementi costruttivi, uniscono saggi che consentano di esaminare, almeno localmente, le caratteristiche della muratura sotto intonaco e nello spessore, caratterizzando così la sezione muraria, il grado di ammorsamento tra pareti ortogonali e le zone di appoggio dei solai, i dispositivi di collegamento e di eliminazione delle spinte; Indagini estese e diffuse così da ottenere tipizzazioni delle caratteristiche dei materiali e costruttive e una aderenza fedele alla reale varietà della costruzione; Indagini esaustive... estese in modo sistematico con il ricorso a saggi che consentano al tecnico di formarsi un'opinione chiara sulla morfologia e qualità delle murature, sul rispetto della regola dell'arte nella disposizione dei materiali, sia in superficie che nello spessore murario, sull'efficacia dell'ammorsamento tra le pareti e dei dispositivi di collegamento e di eliminazione delle spinte, oltre che sulle caratteristiche degli appoggi degli elementi orizzontali».

4.4. Analisi del comportamento degli edifici in aggregato attraverso il controllo di alcuni parametri costruttivi

Per un corretta pianificazione delle operazioni di riduzione del rischio ed il monitoraggio delle condizioni di sicurezza occorre riconoscere il ruolo essenziale che la qualità costruttiva svolge nel garantire significativi livelli di protezione e dell'importanza rivestita dai processi di trasformazione dell'edilizia storica, quali principali elementi di potenziale riduzione delle prestazioni strutturali, viene proposta un'analisi alla scala urbana del singolo aggregato, per giungere all'elaborazione di indicatori sintetici di criticità che concorrono alla definizione di un indice di vulnerabilità per individuare la propensione al danno dell'aggregato oggetto d'indagine⁶⁴. Tali indicatori vengono definiti attraverso l'analisi dei processi evolutivi tipici che hanno interessato gli aggregati sia in pianta, sia in alzato e mediante l'indagine sulle tecniche e sulle soluzioni costruttive storiche utilizzate in ambito locale. In particolare, la tematica specifica del presente paragrafo è l'individuazione dei meccanismi di danno che possono innescarsi su ciascun aggregato, ed il calcolo dell'indice ad esso relativo, valutato mediante il metodo speditivo.

Le prime procedure di indagine sul costruito storico murario al fine di individuarne le vulnerabilità sismiche sono state elaborate in seguito ai terremoti del Friuli del 1976 e dell'Irpinia del 1980, durante la fase di rilievo e quantificazione del danno⁶⁵. Alcuni ricercatori approfondirono metodi per la valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici, suddivisi in tre categorie⁶⁶:

- a) Metodi diretti tipologici (di categorizzazione, statistici);
- b) metodi indiretti di ispezione e classificazione (semiquantitativi);
- c) metodi meccanici analitici (quantitativi).

Nell'ultimo decennio si sono diffusi inoltre i cosiddetti "metodi ibridi". I primi due metodi sono condotti con approcci di tipo tipologico-probabilistico, applicandoli a un campione più o meno esteso di edifici. Il terzo metodo presuppone la definizione analitica di un modello meccanico che descriva l'edificio, in tutte le sue componenti strutturali e materiche, per verificarne la resistenza.

Applicheremo di seguito un metodo speditivo per la valutazione della vulnerabilità degli aggregati edilizi sviluppato da alcuni gruppi di ricerca⁶⁷, che hanno lavorato sul tema.

1. Fase Conoscitiva (sezione 1 e 2)

Definire la geometria e l'evoluzione degli aggregati

2. Individuazione delle Vulnerabilità' (Sezione 3)

- In pianta
- In alzato (per ribaltamento)
- In alzato (per taglio)

3. Previsione dei Possibili Scenari di Danno (Sezione 3)

4. Calcolo Indice di Vulnerabilità' Analitico (Sezione 4)

La ricostruzione della storia costruttiva dell'aggregato, ossia del processo di edificazione e aggregazione nonché delle successive modificazioni occorse nel tempo, costituisce un passo obbligato anche ai fini di una corretta individuazione del sistema resistente.

Tale approfondimento consente di ricostruire o per lo meno d'ipotizzare la successione cronologica delle fasi costruttive delle diverse porzioni, al fine di individuare gli elementi originari e gli elementi realizzati a seguito del progressivo intasamento degli spazi urbani e, di conseguenza, le zone di possibile discontinuità strutturale e disomogeneità del materiale, sia in pianta che in elevato.

⁶⁴ PROTA, BALSAMO 2017, pp. 65-78.

⁶⁵ Vennero assunte una serie di iniziative per la nuova classificazione sismica del territorio italiano, sulla base delle proposte del CNR. Furono introdotti maggiori livelli di protezione sismica per la progettazione di nuovi edifici; venne formulata un'adeguata normativa sismica per gli interventi di recupero del costruito nei centri storici.

⁶⁶ BRAGA, DOLCE, LIBERATORE 1987; GAVARINI, ANGELETTI 1984; GIUFFRÈ 1986; CORSANEGO, PETRINI 1994.

⁶⁷ In questi ultimi anni, molti studi sono stati sviluppati, concentrando le indagini nelle aree sottoposte con frequenza a terremoti; tuttavia, la conoscenza della vulnerabilità dei beni architettonici nei confronti di eventi sismici costituisce ancora un tema variegato, che richiede studi ulteriori per la definizione di modelli più affidabili di predizione delle conseguenze, in grado di tenere conto degli aspetti specifici legati alle caratteristiche dei sistemi costruttivi dell'epoca, alla conformazione geometrica, alle proprietà meccaniche dei materiali, alle tradizioni locali e al processo di trasformazione subito dalla costruzione nel tempo. Oltre alle conoscenze in merito alla storia costruttiva dell'edificato, sono stati analizzati gli interventi adottati nel tempo, sia quelli più antichi sia quelli recenti. Fra le ricerche più interessanti MOCHI, PREDARI 2016; MOCHI, PREDARI 2018, pp.34-35.

Le analisi della evoluzione morfologica dell'aggregato si basano sulle evidenze direttamente osservabili attraverso un'approfondita ispezione visiva a cui si unisce lo studio della cartografia storica, in particolare catastale che consente di documentare lo sviluppo processuale dell'edilizia di base (aggregazioni sulle mura urbane, aggregazioni su pendii naturali o ricavati da sbancamenti o riempimenti, ecc.). Tale tipo di ricerca non ha solo finalità storico-documentaria ma anche e soprattutto strutturale. Ad esempio, il processo di intasamento progressivo degli spazi urbani è connesso alla presenza o assenza di ammorsature tra le pareti di facciata; in particolare, le unità edilizie realizzate tra edifici già esistenti sfruttandone le pareti laterali e edificando i soli muri di facciata e retro, hanno un'estrema vulnerabilità per l'assenza di ammorsature tra le strutture adiacenti. Anche la presenza di porzioni aggiunte in epoca successiva (corpi aggiunti, sopraelevazioni, sostituzioni di orizzontamenti, ecc.) può costituire elemento di vulnerabilità specifica e di attivazione di meccanismi di collasso critici in caso di sisma. Fra i fattori d'alterazione, il cambio d'uso intercorso nel tempo può aiutare a ricostruire la cronologia del manufatto, valutando le più significative modificazioni strutturali apportate in passato e la compatibilità di tali destinazioni rispetto alla compagine strutturale, in relazione alla sua risposta sismica. Nell'esempio che segue sarà possibile verificare rispetto ad un caso studio come sia avvenuto il processo aggregativo e come questo abbia influito sul comportamento degli edifici rispetto alle azioni sismiche.

Leggere il tessuto nell'ottica di individuarne il sistema di successivi addossamenti ed accrescimenti è fondamentale per comprendere il comportamento degli aggregati sotto sisma, comportamento che si differenzia in base al grado di "ammorsamento" e di continuità della scatola muraria. Per quanto riguarda i singoli edifici ad una prima ricognizione generale si somma il rilievo puntuale di alcuni casi esemplificativi nell'ottica da una parte di comprenderne i caratteri tipologici identitari e dall'altra di definire un abaco dei tipi edilizi e delle loro variazioni sincroniche e diacroniche.

Dal punto di vista strutturale, data la difficoltà dell'analisi degli aggregati, viene individuata l'unità strutturale (US), evidenziando le azioni che su di essa possono derivare dalle unità strutturali contigue. Per questi motivi nelle NTC 2018, al punto 8.7.1, si specifica la difficoltà di effettuare un'analisi globale estesa a tutti gli immobili contigui. In questi casi, l'analisi può essere limitata ad una porzione più o meno estesa dell'aggregato. Secondo la norma, deve essere individuata dal progettista l'unità strutturale (US) oggetto di studio, evidenziando le azioni che su di essa possono derivare dalle unità strutturali contigue. La norma propone, inoltre, metodologie di analisi semplificate diverse per le unità strutturali interne e per quelle di testata o di angolo. La semplificazione consiste nell'analizzare un piano alla volta della unità strutturale trascurando la variazione della forza assiale nei maschi murari dovuta all'effetto dell'azione sismica. In ogni caso, affrontare l'analisi dell'intera unità con un software strutturale adeguato può essere preferibile per la semplicità procedurale, la possibilità di evitare errori e, comunque, per un approccio a favore di sicurezza⁶⁸.

Sulla base dell'osservazione diretta del patrimonio storico-architettonico diffuso nel centro storico di Camerino e degli effetti che su di esso ha provocato il complesso evento sismico sviluppatosi fra 2016 e 2017, la ricerca ha approfondito alcune caratteristiche tecniche dei manufatti che i terremoti, con la loro azione, hanno evidenziato, valutando nel complesso il loro livello di danneggiamento; ciò al fine di ottenere indicazioni utili per gli interventi di riparazione, costruendo un approccio corretto al recupero del patrimonio edilizio danneggiato da un evento catastrofico.

Nello studio condotto sugli edifici in aggregato⁶⁹ del centro storico di Camerino sono stati analizzati alcuni elementi caratterizzanti, quali:

- a) tipologia degli organismi edilizi e morfologia degli insediamenti urbani;
- b) sistemi murari e valutazioni degli indici di qualità;
- c) valutazione dei differenti sistemi costruttivi;
- d) sviluppo e tecniche di caratterizzazione;
- e) studio della concezione strutturale e tecnologica dei manufatti architettonici.

⁶⁸ INDELICATO 2009, pp. 233-236; VALLUZZI ET AL. 2007, pp.1-10.

⁶⁹ Data la specificità degli edifici in aggregato sono state predisposte le *Linee Guida per il rilievo, l'analisi ed il progetto di interventi di riparazione e rafforzamento/miglioramento di edifici in aggregato*. Le *Linee Guida* intendono fornire un quadro sistematico della metodologia e degli strumenti operativi per il rilievo, la diagnostica, la scelta degli interventi e la redazione finale del progetto di intervento su tale tipologia di edifici. Si veda anche *Disciplina degli interventi unitari e degli aggregati edilizi* a cura di Francesco Perrone, 2021, i cui riferimenti sono rappresentati dall'art. 11, decreto-legge 17 ottobre 2016, n.189; Ordinanze del Commissario Straordinario Sisma 2016 n.19 (art.15, 15 bis, 15 ter, 15 quater, 16 e 18), n.39 (art.3, comma 5), n.111 (art.1).

• Nella **Sezione 1**, le informazioni necessarie comprendono la localizzazione, il tipo di aggregato⁷⁰, la sua posizione nel contesto urbano, il disegno delle planimetrie, le foto aeree e altra specifica documentazione che ne illustri i caratteri.

• Nella **Sezione 2**, vengono interpretati i dati relativi al processo evolutivo. Le informazioni necessarie comprendono:

- Rappresentazioni cartografiche storiche (Catasto Pio – Gregoriano e serie dei Catasti storici, conservati negli Archivi di Stato);
- Individuazione catastale attuale;
- Periodo storico di costruzione, geometria ed evoluzione dell'aggregato.

La fase di lettura critica delle trasformazioni intervenuti nell'aggregato è fondamentale; il punto di partenza è una lettura della sua evoluzione nel tempo. A partire dalle cellule elementari, s'individuano le pareti aggiunte attraverso i processi di accrescimento e intasamento.

Nei seguenti casi possono verificarsi facilmente condizioni di scarso ammorsamento:

- Cellule di Saturazione, edificate tra fabbricati già esistenti sfruttandone le pareti laterali e creando nuovi vani con la costruzione di quelle mancanti.
- Cellule di Accrescimento, porzioni o appendici aggiunte in epoche successive.

Altro parametro interessante nella valutazione può essere la presenza di facciate rifuse e di maschi murari di estensione ridotta.

• Nella **Sezione 3**, riguardante l'individuazione degli elementi di criticità, le informazioni comprendono:

- Analisi, in pianta
- Analisi in alzato (ribaltamento)
- Analisi in alzato (taglio)
- Previsione dei possibili scenari di danno

La rifusione delle facciate consiste nella demolizione dei fronti di più celle abitative originarie e successiva costruzione di una unica per conferire maggiore uniformità al fronte strada. Spesso, il nuovo prospetto non viene ancorato alle murature d'ambito e, in caso di sisma, potrebbe essere soggetto a completo ribaltamento per rotazione attorno alla cerniera cilindrica di base.

I caratteri frequenti nelle facciate rifuse sono:

- Uniformità del trattamento;
- Simmetria delle aperture;
- Altezza di gronda unitaria;
- Estensione notevole.

Il comportamento del sistema in aggregato rifuso è spesso migliorato dalla presenza di presidi antisismici.

• Nella **Sezione 4** viene proposto il Calcolo dell'Indice Analitico di Vulnerabilità complessivo, attraverso la formula

$$V = DM \cdot PDM + FR \cdot P_{RF} + RT \cdot P_{RT} + FP \cdot P_{FP} + DT \cdot P_{DT} + M \cdot P_M$$

Dalla formula complessiva si può dedurre l'Indice di vulnerabilità; se compreso fra 0 e 23 il valore è basso; se compreso fra 23 e 28,5 è media. Se il valore è superiore a 28,5 l'aggregato presenta una vulnerabilità alta.

L'**Indice di disconnessione muraria (DM)** valuta l'identità delle disconnessioni murarie presenti all'interno di un aggregato; viene calcolato tramite il rapporto tra il numero di disconnessioni murarie presenti al solo piano terra ed il numero di tutte le possibili disconnessioni del medesimo piano. Non vengono considerate le disconnessioni esistenti nelle facciate in quanto l'effetto della loro presenza viene considerato nell'analisi del ribaltamento delle facciate.

$$DM = n_{=} (disconnessioni\ presenti\ PT) / n_{=} (disconnessioni\ possibili\ PT)$$

⁷⁰ Sulla base della ricognizione delle tipologie di aggregato presenti nel centro storico di Camerino, sono state identificate due tipologie principali, in base alla loro conformazione spaziale relativa sia all'evoluzione temporale, sia alla conformazione geomorfologica: A) Aggregato lineare, morfologie insediative che si dispongono lungo un tracciato che segue l'andamento del versante; B) Aggregato polare, morfologie insediative caratterizzate dalla creazione di uno spazio intermedio intorno al quale si distribuisce un numero limitato di unità strutturali.

Il numero delle possibili disconnessioni viene calcolato come segue:

$$n_{\text{disconnessioni possibili PT}} = \sum_{i=1}^m (n_i - 1)$$

dove n_i è il numero delle aste afferenti al nodo i -esimo d'intersezione tra setti murari ed m è il numero dei nodi.

Per poter quantificare questo indice parziale occorre un quadro conoscitivo piuttosto articolato che coinvolge fasi di edificazione, modalità di aggregazione e morfologia urbana. Si deve individuare il processo di accrescimento del tessuto, risalendo fino alla presumibile conformazione di primo impianto. Si tratta di un Indicatore di vulnerabilità direttamente riconducibili alla conformazione del tessuto, legato alle trasformazioni subite nel tempo ed all'influenza reciproca di edifici contigui, quale la saturazione delle aree in precedenza libere o di percorsi di collegamento da parte di nuovi fabbricati semplicemente accostati a quelli esistenti, senza provvedere alla realizzazione di adeguati ammorsamenti tra le pareti contigue (la mancanza di connessioni tra pareti è la principale causa dell'innescarsi di meccanismi di primo modo, ossia di ribaltamento). L'assenza di ammorsamento tra le pareti impedisce il corretto comportamento scatolare della struttura in muratura.

L'**Indice di ribaltamento (RF)** rappresenta il rapporto tra le superfici delle porzioni di facciate soggette a ribaltamento fuori dal piano e la superficie totale dei fronti. Nel calcolo, la superficie viene epurata dalle aree non riferibili a costruzioni storiche in muratura, ossia semplici recinzioni e edifici di sostituzione in cemento armato. Oltre ad indicare la quantità di superficie potenzialmente soggetta a ribaltamento, tale indice fornisce indicazioni utili in merito alle trasformazioni subite in alzato dall'aggregato, poiché il calcolo tiene conto delle aree interessate dalla presenza di facciate di rifusione e di sopraelevazioni.

$$RF = \frac{\sum_{i=1}^n S_{rib,i}}{S_{tot}}$$

dove $S_{rib,i}$ = superficie ribaltabile i -esima; S_{tot} = superficie totale di tutti i fronti strada; n = numero delle facciate ribaltabili.

L'**Indice di ribaltamento del timpano (RT)** valuta il rapporto tra la somma delle differenze di quota tra la linea di gronda o di colmo di edifici adiacenti qualora superiori a 1,5 m, e la lunghezza totale del fronte, per i soli edifici in muratura; vanno quindi sottratte dal totale dei fronti lo sviluppo delle murature di recinzione e delle facciate di edifici in cemento armato. L'indice in esame ha anche lo scopo di stimare il livello di disomogeneità in altezza dei fronti su strada degli aggregati.

$$RT = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{L_{tot}}$$

Dove h_i = differenza di quota tra edifici adiacenti (con $h_i \geq 1,5$ m); L_{tot} = lunghezza totale dei fronti strada e n = numero delle evenienze in cui si riscontra la differenza di quota significativa. Per $h_i > 3,0$ ml si assume sempre un valore pari a 3,0 ml.

L'**Indice di ribaltamento da falsi puntoni (FP)** valuta quanta parte dell'aggregato è soggetta ad azioni spingenti dovute alla presenza in copertura di falsi puntoni (questi elementi sono presenti nelle coperture a padiglione, dove costituiscono i sostegni dei displuvi e dei compluvi, ma possono rinvenirsi anche nei tetti a semplice o doppia pendenza nel caso in cui queste travi oblique vengano posizionate come rompitratta). L'azione trasmessa da tali elementi può generare, nel caso di tetti a padiglione, il ribaltamento dei cantonali, mentre possono provocare il ribaltamento di porzioni di facciata nel caso in cui siano presenti dei rompitratta, secondo il meccanismo di flessione orizzontale. In entrambi i casi il distacco interessa porzioni di forma triangolare.

Per la determinazione del valore, si rapporta la somma delle superfici murarie che possono essere soggette a questa forma di ribaltamento con l'estensione superficiale dell'ultima fascia del fronte strada, alla quale viene attribuita un'altezza di 1,50 m. Convenzionalmente, si assume che i triangoli di distacco abbiano due cateti di 3,00 m e 1,50 m, in presenza sia dei rompitratta sia dei falsi puntoni sul cantonale d'angolo. Per ogni rompitratta e per ogni cantonale vengono conteggiati due triangoli.

$$FP = \frac{\sum_{i=1}^n S_{rib,i}}{S_{tot}}$$

dove $S_{rib,i}$ = superficie ribaltabile i -esima; S_{tot} = superficie dell'ultima fascia del prospetto di altezza 1,5 m; n = numero delle facciate ribaltabili.

L'Indice di danneggiamento al taglio (DT) valuta gli effetti del secondo modo di danno. Convenzionalmente, ai fini di calcolo dell'indice, si stimano come vulnerabili alle azioni nel piano quelle pareti caratterizzate da una percentuale di forature maggiore rispetto all'area resistente dei maschi murari. L'indice viene calcolato come il rapporto tra le superfici considerate vulnerabili a taglio, intendendo con ciò le unità strutturali caratterizzate dalla presenza di aree finestrate in una percentuale maggiore del 55% rispetto all'area totale delle facciate, e la superficie complessiva dei fronti.

$$DT = \frac{\sum_{i=1}^n S_{taglio,i}}{S_{tot}}$$

dove $S_{taglio,i}$ = superficie vulnerabile a taglio i-esima; S_{tot} = superficie totale della facciata; n = numero delle facciate.

L'Indice di danneggiamento per martellamento (RF) stima la presenza di edifici con strutture intelaiate in cemento armato, in adiacenza a edifici in muratura, i quali possono subire azioni di martellamento. Viene calcolato come il rapporto tra la lunghezza in facciata della superficie di contatto tra i due edifici e la lunghezza totale del fronte su strada.

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n L_{cont,i}}{L_{tot}}$$

dove $L_{cont,i}$ = lunghezza di contatto i-esima tra edificio in muratura e edificio in cemento armato; L_{tot} = lunghezza totale del fronte strada e n = numero delle evenienze in cui si riscontra un contatto tra edifici in muratura e edifici in cemento armato.

Qualora nell'aggregato non siano presenti interi edifici con struttura intelaiata in cemento armato, ma venga invece rilevata la presenza di solai rigidi in laterocemento posti a livelli diversi rispetto ad una stessa muratura d'ambito, tale indice può essere modificato, rapportando la somma di tutte le superfici di contatto tra i solai sfalsati e le murature con la somma delle superfici delle pareti che dividono le unità strutturali dell'aggregato.

$$M(S) = \frac{\sum_{i=1}^n S_{solai,i}}{S_{tot}}$$

dove $S_{solai,i}$ = superficie di contatto i-esima tra muratura d'ambito e solai sfalsati; S_{tot} = somma delle superfici delle murature d'ambito; n = numero delle evenienze in cui si riscontra la presenza di solai in laterocemento sfalsati.

In relazione al valore complessivo dell'Indice di Vulnerabilità, possono essere adottati dei coefficienti correttivi relativi alla qualità muraria. Tale coefficiente si basa sulle medesime tipologie murarie presenti nella Circolare applicativa relativa alle NTC 2018. Le murature storiche vengono suddivise in 5 categorie generali derivanti dalle loro caratteristiche costitutive:

1. Muratura disordinata in pietrame;
2. Muratura a conci sbozzati;
3. Muratura mista (pietre-laterizio);
4. Muratura in pietre a spacco;
5. Muratura in mattoni pieni.

Come abbiamo potuto osservare in precedenza, la qualità della muratura incide in maniera determinante sul comportamento delle strutture, costituendo l'anello debole del sistema costruttivo sia dell'edificio singolo, sia del sistema in aggregato, dove la risposta sismica è condizionata dai rapporti fra i differenti corpi di fabbrica. Tale metodo ha certamente il vantaggio di aver considerato le interazioni fra elementi disomogenei e discontinui, frutto di quella storia costruttiva locale, analizzata attentamente per il centro storico di Camerino, nelle Marche.

	Valore della muratura realizzata secondo la regola dell'arte	Malta scadente	Giunti spessi	Assenza di ricorsi e/o listature	Assenza di elementi di collegamento trasversale	Nucleo scadente e/o ampio
1. Muratura in pietrame disordinata	1	-0,25	0	-0,15	-0,25	-0,05
2. Muratura a conci sbozzati	2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,25	-0,1
3. Muratura mista (pietra – laterizio)	3	-0,15	-0,15	-0,1	-0,2	-0,15
4. Muratura in pietre a spacco (buona tessitura)	4	-0,15	0	-0,05	-0,15	-0,1
5. Muratura in mattoni pieni	5	-0,25	-0,25	0	-0,15	-0,15

* * *

La ricerca non ha uno scopo puramente descrittivo ma è stata redatta con l'obiettivo di condividere e mettere in discussione osservazioni, riflessioni che sono maturate in questi ultimi anni, soprattutto nelle aree maggiormente colpite dal sisma come quella di Camerino.

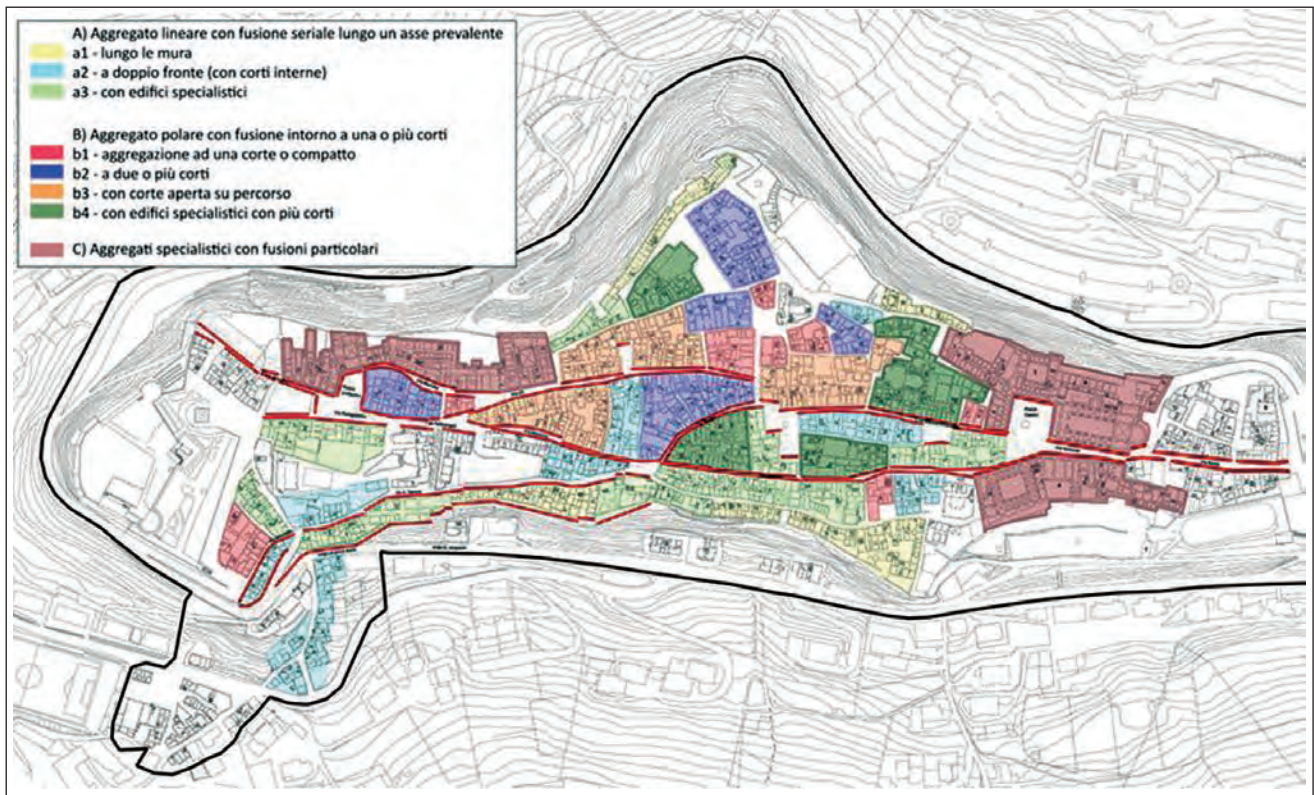
In tal senso, negli ultimi anni, la ricerca applicata ha contribuito notevolmente ad una nuova presa di coscienza. Il riconoscimento della validità o meno di alcuni interventi risulta essenziale affinché si possa imparare dal passato. Per questo motivo, sono state messe in discussione le conseguenze dell'impiego dei più diffusi interventi moderni. Essi non solo non sono rispettosi delle tecniche costruttive locali ma introducono vulnerabilità aggiuntive.

L'analisi dei risultati ottenuti dall'applicazione delle citate metodologie ha evidenziato che il costruito del centro storico di Camerino è caratterizzato da una vulnerabilità di livello elevato. I meccanismi di collasso prevalenti sono quelli nel piano delle pareti murarie. Il confronto fra le metodologie, ha mostrato che il metodo di analisi degli aggregati consente di stimare, con una certa precisione, il comportamento sismico delle costruzioni raggruppate in comparti edilizi. Per quanto concerne infine l'analisi della qualità muraria delle costruzioni investigate, caratterizzate sostanzialmente da evidenti carenze costruttive e da riparazioni non efficaci dopo precedenti eventi, come quelli del 1997, si è riscontrato che più della metà delle stesse presentano indici di livello medio-basso, per questo gli effetti di danneggiamento indotti dal terremoto sono stati molto estesi.

Come è stato recentemente sostenuto, la descrizione e interpretazione dei danni osservati tende a organizzare l'esperienza in una "memoria esperta" di riferimento alla quale attingere per ricercare e individuare in un dato edificio le vulnerabilità tipiche e specifiche, ed ipotizzare i meccanismi e i modi di danno in essi possibili⁷¹. Solo dopo aver costruito una anamnesi completa si potrà influenzare positivamente il progetto di restauro, orientando le scelte verso una riduzione del rischio sismico⁷².

⁷¹ Fra i vari scritti, si veda DOGLIONI, MORETTI, PETRINI 1994, pp-23-30.

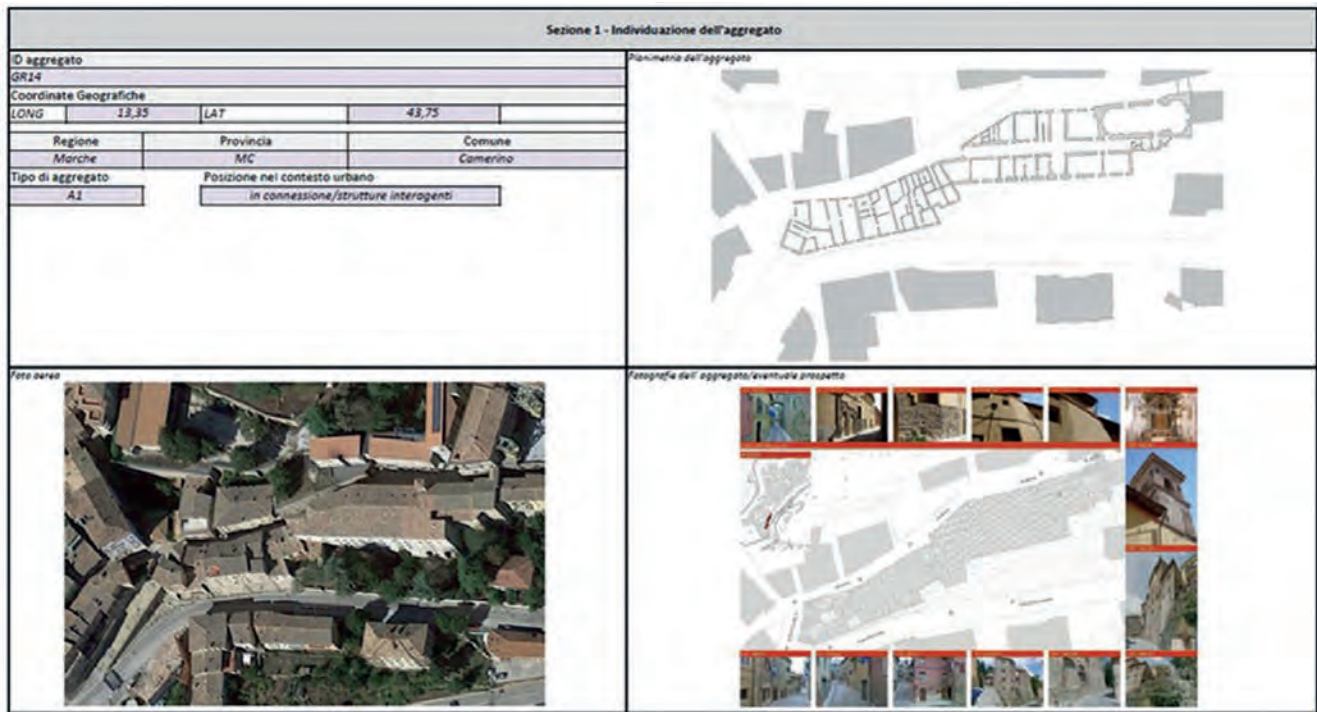
⁷² COISSON, OTTONI 2013, pp. 59-112.



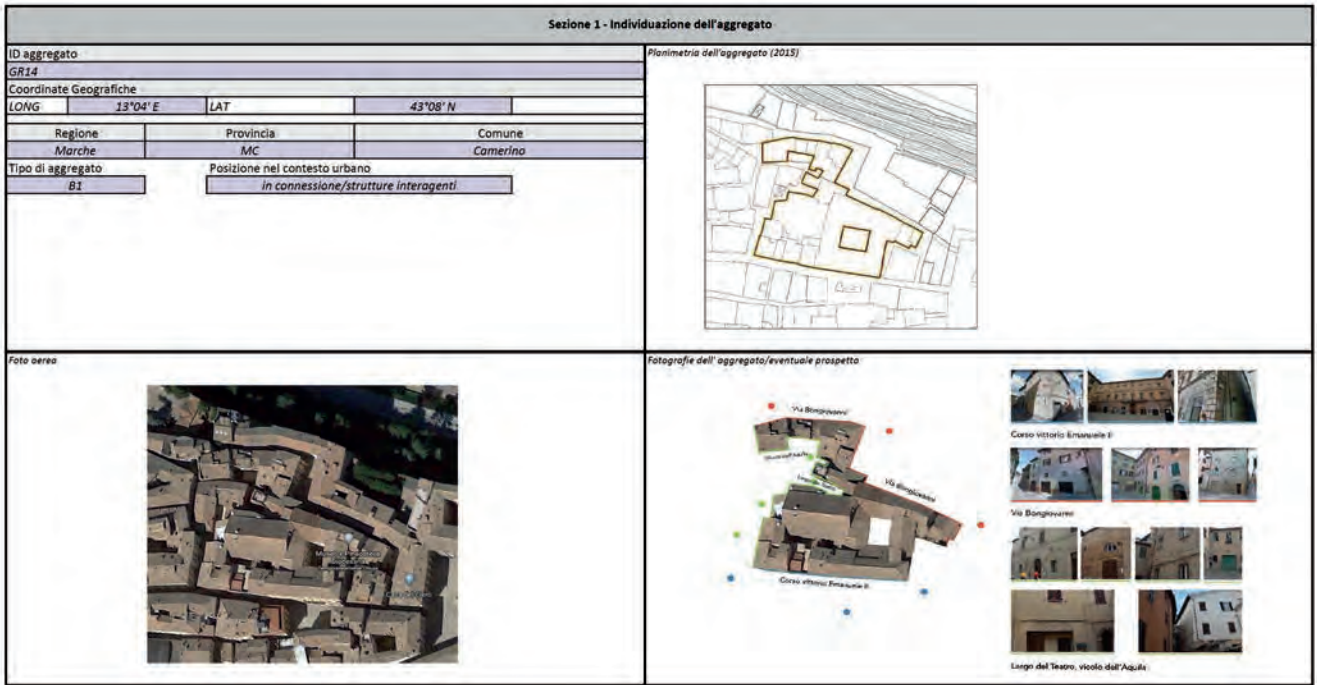
4.27

FIG. 4.27 Caratteristiche del sistema in aggregato nel centro storico di Camerino.

FIG.4.28 Informazioni generali sull'aggregato oggetto di studio.

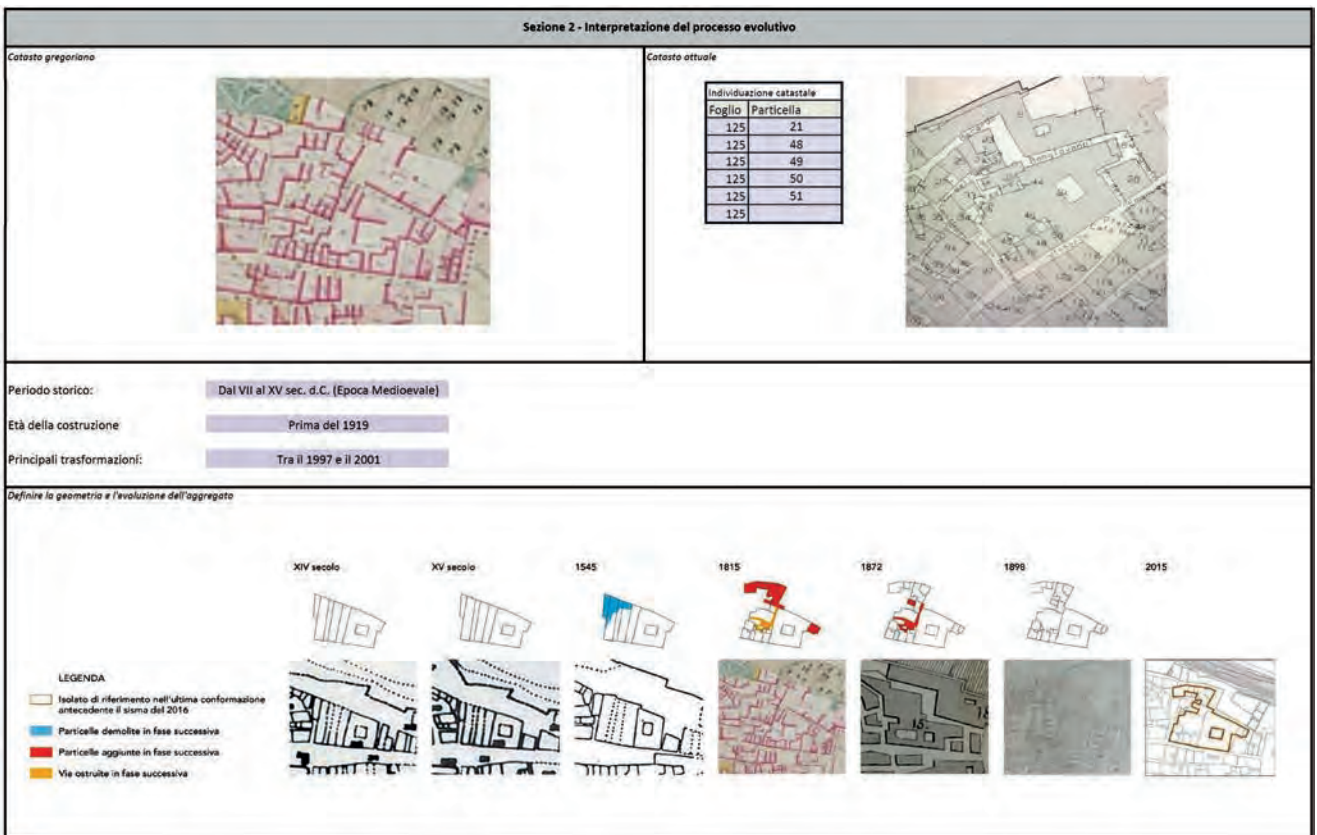


4.28



4.29a

FIG.4.29a-b Indicazioni per la compilazione della Sezione 2 relativa all'interpretazione del processo evolutivo dell'aggregato di studio.

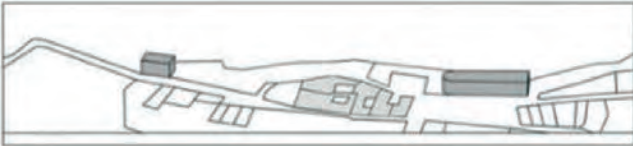
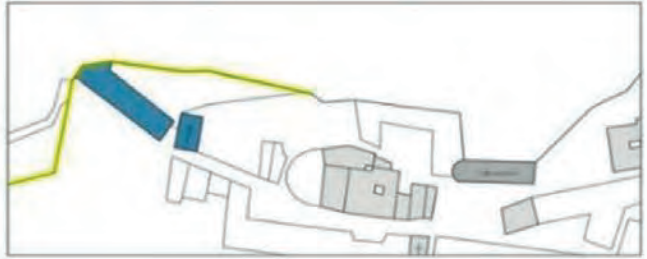
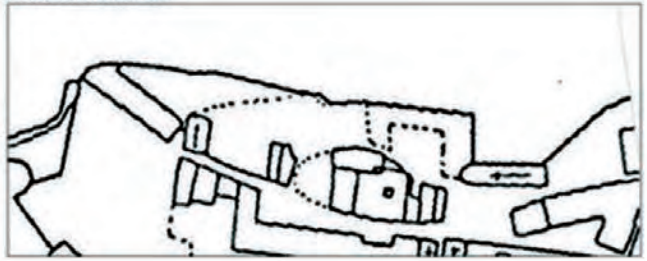


4.29b

CARTOGRAFIA XIV sec.



CARTOGRAFIA XVI sec.



CATASTO GREGORIANO 1816



CARTOGRAFIA 1939

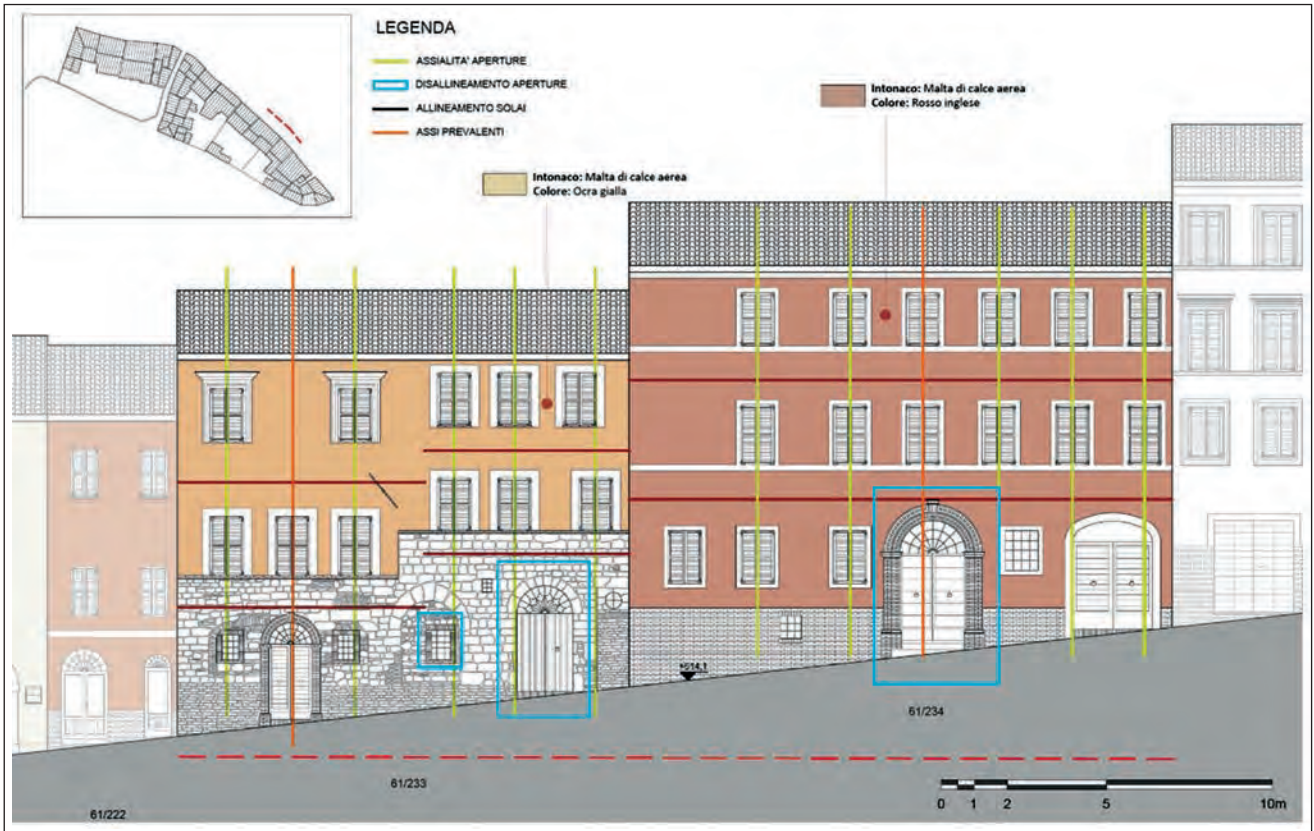


4.30

LEGENDA

- EDIFICI OGGETTO DI STUDIO
- EDIFICI
- EDIFICI DI NUOVA COSTRUZIONE
- AMPLIAMENTO MURA
- FRAZIONAMENTO DELLE PARTICELLE
- FUSIONE DELLE PARTICELLE
- EDIFICI DEMOLITI

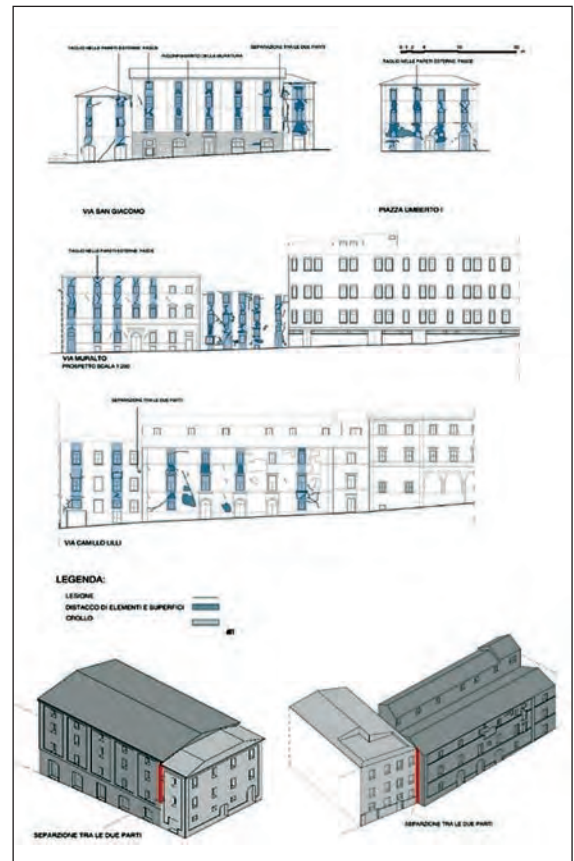
FIG.4.30 Descrizione del processo evolutivo dell'aggregato attraverso la lettura della cartografia storica.



4.31



4.32

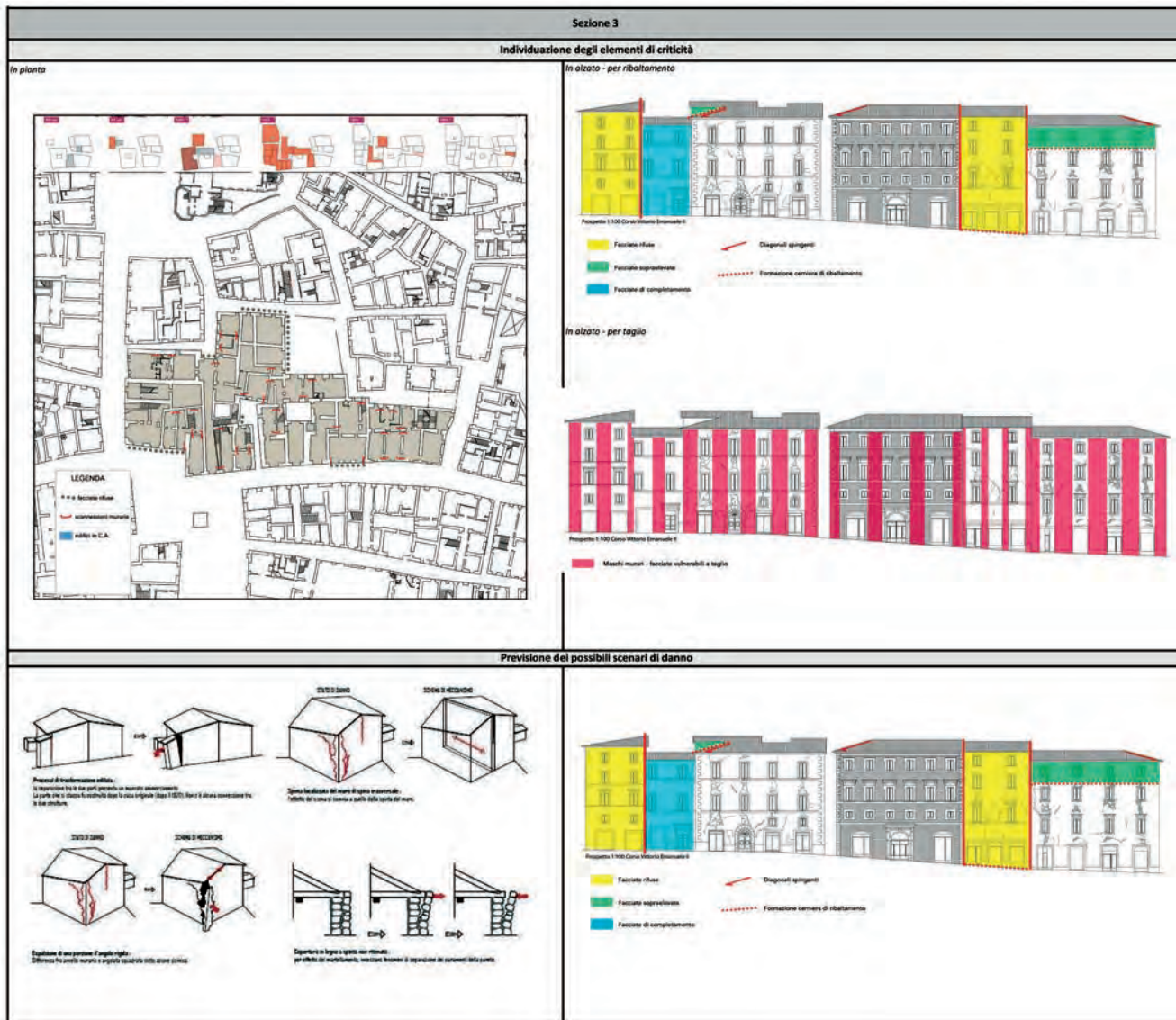


4.33

FIG.4.31 Individuazione degli allineamenti delle aperture e dei solai di un aggregato disposto in elevata pendenza.

FIG.4.32 Presenza di presidi antisismici inseriti durante gli interventi che hanno interessato l'aggregato dopo i più importanti eventi che hanno interessato la zona di Camerino.

FIG.4.33 Lettura dei quadri fessurativi e deformativi e individuazioni delle discontinuità costruttive.



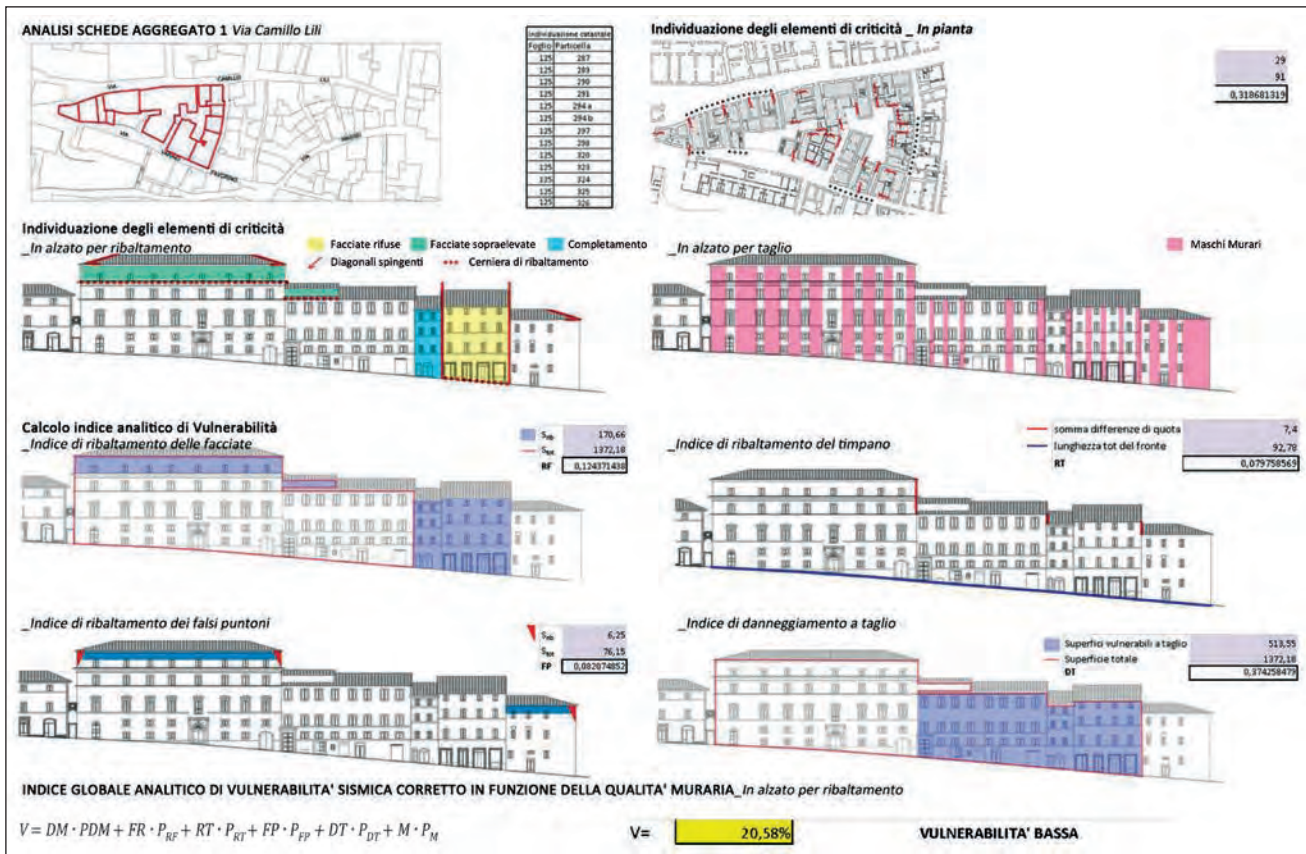
4.34a

FIG.4.34a-b Individuazione dei principali elementi di criticità e previsioni dei possibili scenari di danno dell'aggregato



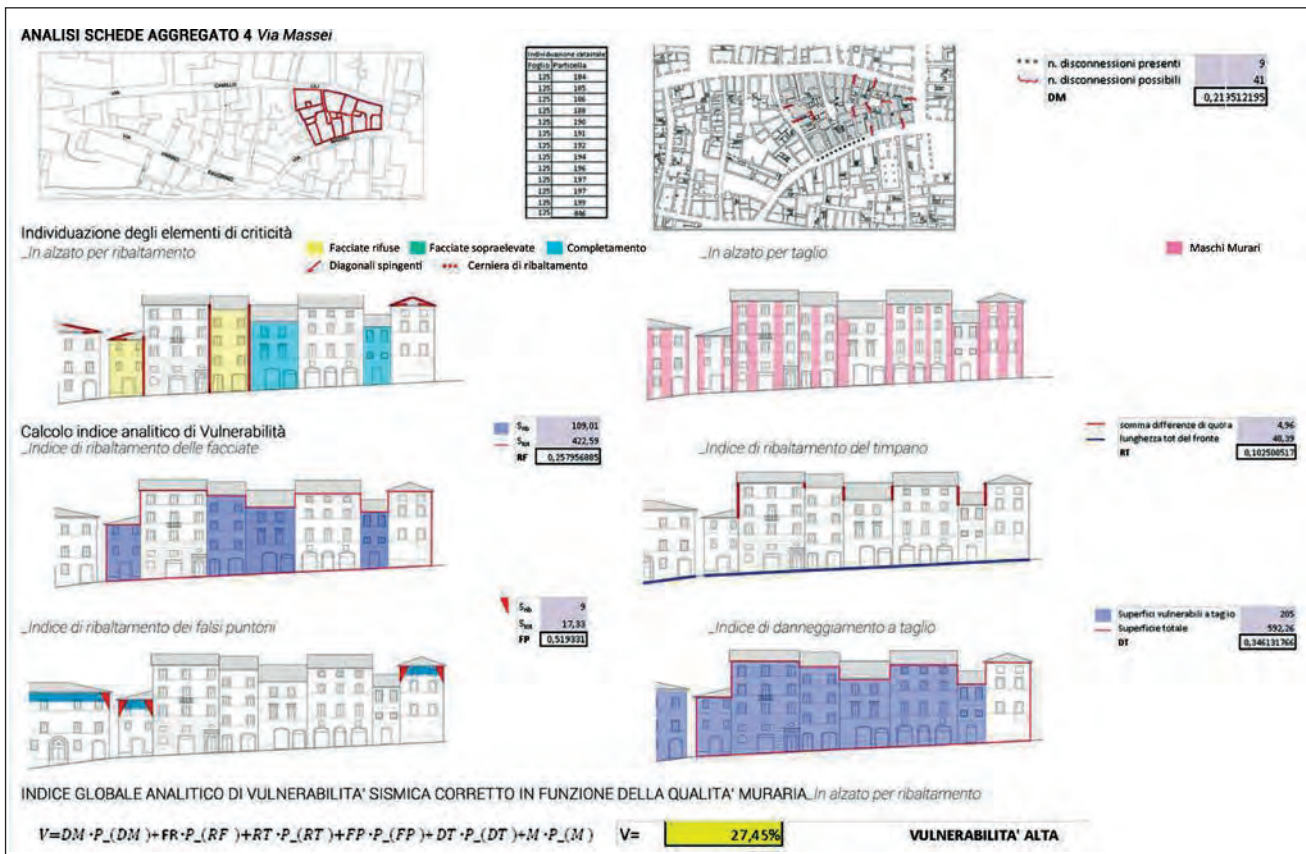
4.35

FIG. 4.35 Indicazioni degli andamenti dei muri rispetto al fronte principale. Sono analizzati muri ortogonali alla facciata e muri paralleli, indicazioni di una fase originaria di costruzione della cellula elementare, poi rifusa da processi d'intasamento degli spazi liberi.



4.37a

FIG.4.37a-b Sintesi delle informazioni contenute nella Sezione 4 dove è inserito il valore dell'Indice di Vulnerabilità dell'aggregato esaminato.



4.37b