

### 3.3 IL RILIEVO DELLA VULNERABILITÀ E DEL DANNO SISMICO ALLE CHIESE

#### 3.3.1 - Una metodologia per la valutazione della vulnerabilità degli edifici storici: la “scheda chiese” del Gruppo Nazionale Difesa dai Terremoti

S. Podestà

I manufatti storici in muratura, specie se a carattere monumentale sono generalmente realizzati dalle migliori maestranze con materiali di buona qualità e presentano in genere un adeguato livello di sicurezza alle azioni ordinarie ed un'elevata durabilità; la loro presenza è già di per sé una testimonianza d'efficienza statica. La storia del costruire ci propone, anche nei centri minori, manufatti che oggi stupiscono per la loro arditezza strutturale. I materiali adottati, naturali (pietra, legno) o artificiali (malte, laterizi), in alcuni casi migliorano addirittura nel tempo le loro caratteristiche meccaniche (malte di calce pozzolanica, legno) purché adeguatamente protetti attraverso una continua manutenzione (intonaco, manto di copertura, condizioni idrogeologiche in fondazione).

Il confronto in termini di sicurezza tra una costruzione storica ed una di moderna realizzazione appare problematico per due ordini di motivi. Ogni nuova costruzione viene descritta attraverso un modello meccanico, capace di tradurre il suo comportamento in forma analitica o numerica; in tale modo è possibile una verifica della sicurezza in termini quantitativi. Inoltre la natura probabilistica del concetto di sicurezza rende convenzionali i coefficienti introdotti nelle attuali normative per le verifiche delle strutture moderne, per questo definite *meccanicamente controllate* (1); tali coefficienti di sicurezza sono tarati in modo da realizzare strutture che funzionino ad un costo sostenibile. Nel passato invece le costruzioni venivano realizzate facendo tesoro dell'esperienza acquisita dalle costruzioni esistenti, tradotta in *regole dell'arte* nella maggior parte dei casi non scritte. Il bravo costruttore utilizzava l'intuizione, riconducibile ai concetti dell'equilibrio tra corpi, e la sperimentazione, su modelli in scala, per mettere a punto nuove soluzioni tecnologiche o proporzionamenti geometrici più arditi; anche queste diventavano regole dell'arte, se si dimostravano corrette a seguito del loro utilizzo. Quindi, realizzare l'opera in conformità alle *regole dell'arte* equivaleva a rispettare le attuali verifiche di norma; si può dunque affermare che, intervenendo oggi su un manufatto, riconoscendone la conformità alle regole dell'arte e leggendone la *storia* è, in sostanza, come farne il collaudo.

Per queste ragioni l'analisi strutturale di un edificio monumentale deve essere inquadrata all'interno di uno studio multidisciplinare, che affronti il progetto di restauro partendo da un'approfondita conoscenza, rivolta ai seguenti aspetti: la sua storia (accrescimenti, trasformazioni, eventi traumatici), il rilievo critico (geometria, tecnologia), le caratteristiche dei materiali ed il loro degrado, il rilievo del quadro fessurativo e deformativo. La sintesi di queste informazioni consente di interpretare il comportamento strutturale e formulare la diagnosi del manufatto, che mette in evidenza gli eventuali elementi di debolezza dell'organismo, siano essi originari o conseguenza dei dissesti e del degrado. Questo modo di procedere cade parzialmente in difetto quando si considerano azioni eccezionali, come il terremoto, che rappresenta uno dei rischi di maggiore impatto per il costruito storico. Gli edifici in muratura sono caratterizzati da un'intrinseca vulnerabilità all'azione sismica: la “struttura” muratura, nonostante le molteplici forme in cui si può riscontrare, è essenzialmente concepita per resistere a carichi verticali. La disposizione dei conci per filari orizzontali, è da attribuire alla volontà del costruttore di disporre gli elementi di maggior debolezza (i giunti di malta) ortogonali alla curva delle pressioni indotta dalle azioni di pura compressione (pesi propri o portati). In occasione di un sisma, l'azione orizzontale genera

degli stati di tensione tangenziale e di trazione che superano la debole resistenza del materiale determinando lesioni per scorrimento o distacco degli elementi. La storia di questi manufatti, inoltre, caratterizzata da diverse fasi costruttive, accentua quel comportamento per parti, che è già di per sé insito nel materiale che li compone; gli accrescimenti, le superfetazioni, gli ampliamenti planimetrici determinano la presenza di molte strutture all'interno della stessa costruzione il cui comportamento è fortemente influenzato dall'azione che le investe. Nel caso di un terremoto le forze inerziali orizzontali sono in grado di causare la perdita d'equilibrio in elementi snelli o non adeguatamente connessi al resto della costruzione.

A fronte di queste considerazioni, che possono ascriversi ad una vulnerabilità intrinseca di tali strutture, è importante ricordare come i danni maggiori occorrono in strutture ormai fortemente "degradate". L'incremento di degrado che tali strutture hanno subito negli ultimi 50 anni è da imputarsi alla mancanza di quella manutenzione che era invece effettuata costantemente sull'opera, fatta di piccole riparazioni continue, che avevano il pregio di mantenere la sicurezza della costruzione ad un livello accettabile senza sconvolgere il comportamento originario dell'edificio. Un'ulteriore vulnerabilità può essere rappresentata dai dissesti subiti durante terremoti storici: anche se in molti casi il sisma può essere visto come un collaudo dell'opera, bisogna sottolineare come questo ci restituisca un manufatto dal comportamento strutturale profondamente diverso rispetto a quello antecedente all'evento. Le lesioni nella muratura sono ferite che non vengono mai completamente cancellate. L'evento sismico può costituire una sorta di collaudo, ma rappresenta anche un parziale azzeramento della storia sismica; inoltre, in molti casi, si è di fronte a fabbriche che non hanno mai subito l'intensità massima attesa per il sito e quindi per molti edifici manca un vero collaudo. Esistono ovviamente *regole dell'arte* specificatamente rivolte a cautelarsi da tale azione: la buona qualità degli ammorsamenti, l'uso d'architravi d'adeguata rigidità, la realizzazione di un comportamento scatolare tramite catene e cerchiature, l'inserimento di contrafforti a contrasto dei meccanismi di ribaltamento sono alcuni esempi di soluzioni tecnologiche frequentemente adottate nelle aree a maggior rischio sismico. Tuttavia, il terremoto è un'azione poco frequente e forse è proprio questa la chiave d'interpretazione di tale vulnerabilità: il periodo di ritorno per un sisma di intensità significativa è di almeno 100 anni, quindi circa tre generazioni. Le regole dell'arte erano frutto dell'esperienza del costruttore e venivano tramandate all'allievo: quando un costruttore acquisiva l'esperienza del terremoto, osservando direttamente i meccanismi di danno prodotti, attraverso una comprensione intuitiva del comportamento strutturale elaborava una serie di accorgimenti per il buon costruire e per il miglioramento sismico degli edifici danneggiati. Tali regole erano applicate per una, forse due generazioni, ma venivano gradualmente abbandonate proprio in quanto, persa la memoria del danno provocato dal terremoto, non veniva veramente compresa la necessità.

In molti centri storici, infatti, è possibile individuare accorgimenti costruttivi, tutti risalenti allo stesso periodo storico, in genere immediatamente successivo ad un evento traumatico, messi in opera per attuare una sorta di miglioramento sismico durante gli interventi di riparazione dei danni. In tal caso è possibile parlare di una cultura sismica della riparazione che innalza momentaneamente il livello di sicurezza del centro storico, essendo un evento sporadico nella vita dell'agglomerato urbano. Nel caso in cui tali soluzioni progettuali modificano il modo di costruire locale, è possibile parlare di cultura sismica della prevenzione e si può notare, leggendo il tessuto urbano di un centro storico come i presidi antisismici (contrafforti, archi a contrasto, catene e cerchiature) siano utilizzati diffusamente sull'edificato.

Quando si parla di strutture monumentali, seppur la varietà tipologica delle costruzioni

sia molto ampia (edifici nobiliari, ponti in muratura, torri, cinte murarie, castelli, siti archeologici, interi centri storici) non si può prescindere da attribuire alle chiese un ruolo particolare. Soprattutto in Italia l'elevato numero di tali edifici sul territorio e l'elevata percentuale relativa (circa 80% del patrimonio architettonico è, infatti, costituito da edifici di culto) determina la necessità di valutazioni che traggono dalla forte connotazione tipologica di tali manufatti lo spunto per definire le più appropriate politiche di prevenzione. L'osservazione sistematica dei danni prodotti da precedenti terremoti sul territorio italiano ha chiaramente evidenziato come il comportamento sismico delle chiese risulti inquadrabile secondo fenomenologie ricorrenti. Infatti, pur nella varietà delle tecniche costruttive, delle dimensioni e delle forme con cui si presentano le chiese d'epoche ed importanza diverse, la fabbrica risulta quasi sempre costituita da una facciata, un'aula (ad una o più navate), un presbiterio e un'abside; a questi elementi si possono aggiungere il transetto, la cupola, le cappelle laterali; inoltre quasi sempre è presente un campanile o una vela. A questa classificazione degli elementi architettonici corrisponde in genere un comportamento strutturale in gran parte autonomo, proprio in virtù della tipologia di questi manufatti: grandi spazi senza muri di spina interni (ad eccezione delle colonne e degli archi di separazione tra le navate); assenza di orizzontamenti intermedi (o al massimo presenza di una volta); pareti snelle; accrescimenti successivi della fabbrica, con soluzioni di continuità nell'apparato murario. La struttura portante è quindi, nella maggior parte dei casi, leggibile abbastanza chiaramente e un'analisi semplificata può essere eseguita attraverso valutazioni qualitative.

Il primo importante esempio di studio sulle chiese è rappresentato dall'analisi eseguita sulle chiese friulane, colpite dal terremoto del 1976 (2) ; in esso è stata sviluppata una metodologia di analisi della vulnerabilità che può essere ricondotta a tre fasi: a) rilievo della fabbrica attraverso un'apposita scheda, estremamente dettagliata nella descrizione della geometria, dei materiali, del quadro fessurativo; b) suddivisione della fabbrica in *macroelementi*, ovvero parti costruttivamente riconoscibili ed unitarie sotto il profilo della risposta sismica (facciata, abside, campanile, ecc.); c) individuazione dei possibili modi di danno e meccanismi di collasso, associati a ciascun *macroelemento*. La metodologia consente quindi un esame schematico dei danni prodotti dal sisma, al fine di constatare a posteriori la vulnerabilità dei diversi elementi.

La "scheda chiese" appena citata è stata successivamente applicata in altre attività del GNDT (*Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti*) ed in particolare nelle chiese delle Province di Modena e Reggio Emilia, colpite da un sisma nel 1987 (3). Tale terremoto ha messo in evidenza come le chiese risultino, in genere, più vulnerabili rispetto ad altre tipologie di manufatti ed in particolare rispetto agli edifici. Infatti, terremoti che non presentano un impatto significativo sull'edilizia residenziale, ovvero che producono danni ad elementi non strutturali o comunque lievi fessurazioni che non comportano inagibilità, determinano situazioni di instabilità in alcuni elementi delle chiese, spesso con crolli locali in alcune parti (volte in foglio, timpani delle facciate, ecc.).

Tale impostazione, tuttavia, presuppone che la previsione dei danni sismici sulle chiese in un dato territorio possa essere fatta solo dopo una constatazione preventiva dei danni prodotti da un sisma su chiese analoghe e, in considerazione della grande variabilità, c'è il rischio di non poter utilizzare questo metodo a fini di prevenzione. Le metodologie di rilievo in cui si è considerato come aspetto principale quello tipologico hanno, infatti, evidenziato dei limiti nell'interpretazione dei danni anche su corpi di fabbrica architettonicamente simili, mettendo in luce come la sola tipologia non possa essere presa come unico parametro discriminante per valutare la risposta strutturale di un edificio sottoposto ad azioni dinamiche. Tali fattori hanno determinato la formulazione di un nuovo metodo (4) che sintetizza i diversi modi di danno

che si sono evidenziati a seguito di sisma in un certo numero di meccanismi di collasso fondamentali; in questo modo le diverse modalità con le quali macroelementi differenti per proporzioni e materiali si lesionano vengono riconosciute cogliendone il cinematismo di collasso, ovvero l'essenza propria della vulnerabilità. Questi cinematismi sono sempre riconducibili ai due meccanismi fondamentali che si realizzano tra due corpi rigidi, ovvero tra le due porzioni in cui si divide il solido murario a seguito di una fessurazione: la rotazione o lo scorrimento relativo. Questi meccanismi sono in genere associati al comportamento degli elementi quanto sollecitati, rispettivamente, da azione fuori dal piano o nel piano dell'elemento stesso; essi si evidenziano in maniera differente nei diversi macroelementi della chiesa, in relazione alla loro forma. Tale metodologia, adottata per l'analisi di vulnerabilità delle chiese del Molise, può essere utilizzata sia in termini di prevenzione, sia nella gestione di un'emergenza sismica. La strategia della prevenzione è certamente la strada maestra per la riduzione del rischio sismico. A tale riguardo la metodologia consente un censimento rapido delle chiese su un certo territorio, attraverso una conoscenza delle caratteristiche tipologiche essenziali alla valutazione della risposta sismica. Al fine di una più affidabile previsione del danno atteso, oltre ad alcune indicazioni dimensionali, la scheda mira ad individuare le carenze costruttive che favoriscono l'attivazione di ciascun meccanismo di danno; queste sono spesso legate a dettagli piuttosto che a considerazioni generali sulla fabbrica (presenza di catene, ammorsamenti, ecc.). Inoltre il rilievo del danno pregresso rappresenta un'ulteriore preziosa informazione, in quanto i terremoti del passato lasciano segni che spesso non vengono cancellati e possono ancora oggi essere riconosciuti. Il risultato di questa analisi è ovviamente lo scenario di danno atteso a fronte del terremoto di riferimento per l'area. Questo può indirizzare le strategie di prevenzione a livello territoriale, ovvero tramite analisi costi-benefici definire come utilizzare al meglio le risorse disponibili per ridurre il rischio sismico, e suggerire, per il singolo manufatto, gli interventi di miglioramento che permettono di ottenere un'effettiva conservazione del bene, senza sottovalutare le problematiche della sicurezza.

Nell'emergenza post-terremoto esiste invece la necessità di uno strumento agile e sintetico, con il quale rilevare rapidamente un elevato numero di manufatti mettendo in evidenza il danno subito, le condizioni di agibilità, la necessità di opere provvisorie a tutela dell'incolumità pubblica ed a salvaguardia del bene e di quanto in esso contenuto, per evitare maggiori danni a seguito delle successive scosse. La scheda è strutturata in modo da guidare il rilevatore nel sopralluogo, evitando un rilievo dimensionale accurato, che rallenterebbe enormemente le operazioni di verifica senza apportare sostanziali incrementi di conoscenza della risposta strutturale, ma prediligendo l'interpretazione dei meccanismi di danno attivati dal sisma e l'individuazione dei particolari costruttivi fondamentali nei riguardi della vulnerabilità. Questo metodo di rilievo del danno rappresenta quindi una vera e propria diagnosi preliminare della risposta sismica del manufatto. È stato così possibile elaborare un modello per la stima economica dei danni, attraverso una valutazione dei costi di ripristino e miglioramento sismico, e tradurre i dati rilevati in indicazioni progettuali, per l'avviamento degli interventi di miglioramento sismico.

### La scheda per il rilievo del danno e della vulnerabilità sismica delle chiese

In questo paragrafo è riportata una breve descrizione della metodologia adottata per l'analisi di vulnerabilità del patrimonio ecclesiastico molisano indagato. Tale scheda messa a punto per il rilievo del danno sismico delle chiese della Lunigiana e Garfagnana danneggiate dal terremoto del 1995, è stata utilizzata per i principali eventi sismici italiani. La tabella 3.1.1.1 mostra, infatti, il numero di manufatti rilevati, evidenziando come anche per terremoti di modesta intensità il numero di chiese coinvolte sia molto elevato.

<i>Area</i>	<i>Evento sismico</i>	<i>Numero chiese</i>
Lunigiana e Garfagnana	15 ottobre 1995	32
Umbria	26 settembre 1997	1200
Marche	26 settembre 1997	1800
Provincia di Arezzo	11 maggio 1997	71
Pollino	20 ottobre 1999	185
Lazio	11 marzo 2000	39
Asti e Alessandria	20 novembre 2000	600

Tabella 3.3.1.1 - Chiese danneggiate in recenti terremoti

La scheda, riportata nel CD allegato alla presente pubblicazione, presenta una parte iniziale dove sono indicate la denominazione del manufatto, la collocazione toponomastica, i dati relativi al sopralluogo (squadra che ha eseguito il rilievo, data dello stesso, persona che ha consentito l'accesso). Inoltre sono richieste informazioni sui seguenti aspetti: a) caratteristiche del sito; b) posizione nel contesto; c) condizioni d'uso e possibilità di affollamento; d) stato di manutenzione generale; è evidente che questi dati, anche se non sono caratteristiche intrinseche della fabbrica, influenzano la vulnerabilità ed in particolare sono utili in analisi complessive di rischio, dove si considerano gli aspetti della pericolosità e delle perdite.

La scheda è articolata in sette sezioni:

**1. Dati tipologici e dimensionali:** contiene informazioni sulla tipologia e le dimensioni della chiesa, scomposta nei diversi elementi architettonici (aula, presbiterio, abside, transetto, cappelle, copertura, cupola, cripta, facciata, campanile, sacrestia); in particolare si concentra l'attenzione sugli elementi strutturali ritenuti determinanti nei riguardi della risposta sismica della fabbrica (contrafforti, catene, ecc.). Le poche misure richieste costituiscono un'indicazione di massima sulla dimensione della chiesa, utile ad esempio nella stima dei costi dell'intervento, e possono essere facilmente acquisite. La sezione è strutturata in modo tale da risultare comprensibile anche senza uno specifico manuale di istruzioni, pur di avere una buona conoscenza della nomenclatura degli elementi architettonici dell'edilizia storica. Un obiettivo di questa sezione è anche quello di guidare il rilevatore attraverso un percorso di conoscenza della fabbrica, scomposta nei diversi elementi che la compongono.

**2. Danni ad elementi di valore artistico:** si richiede di segnalare la presenza di beni artistici nelle diverse parti all'interno della chiesa e, nel caso d'uso in emergenza a seguito di terremoto, di indicare gli eventuali danni prodotti su tali beni dal sisma; questi possono essere direttamente associati al lesionamento della fabbrica (affreschi), dovuti al distacco di elementi decorativi (stucchi) o al ribaltamento di elementi di pregio (statue), indotti dalla caduta di parti murarie su arredi sacri (tabernacoli, organi). In ogni caso la scheda non richiede alcuna preparazione culturale specifica sul valore storico-artistico dei beni rilevati, ma ha solo lo scopo di segnalare tempestivamente a chi competente la necessità di un approfondimento.

**3. Indice di danno e indice di vulnerabilità:** nella sezione sono elencati i 18 meccanismi di collasso caratteristici per le chiese; per ogni meccanismo sono riportate le più frequenti modalità di danno, illustrate in un abaco riprodotto in figura 3.3.1.4 (che rappresenta una sorta di manuale di istruzioni), e i 2 indicatori di vulnerabilità connessi al meccanismo.

1	<b>RIBALTAMENTO DELLA FACCIATA</b>	
Danno	DISTACCO DELLA FACCIATA DALLE PARETI	
Vulnerabilit	(non so)	Ammorsamento scadente tra la facciata ed i muri della navata Assenza di catene longitudinali o di contrafforti efficaci

Figura 3.3.1.2 - Esempio di rilievo del danno e della vulnerabilità su un meccanismo

Il rilievo è stato eseguito indicando (vedi figura 3.3.1.2): a) la possibilità di attivazione del meccanismo di collasso; b) l'entità del danno (graduando il proprio giudizio su 3 livelli: 0-danno nullo; 1-danno lieve; 2-danno medio; 3-danno grave); c) le vulnerabilità intrinseche della fabbrica a quel meccanismo, tramite i due indicatori già citati. È evidente che nel caso di uso della scheda in fase preventiva, la compilazione relativa al danno può essere omessa; tuttavia in molti casi i danni prodotti in occasione di precedenti terremoti sono ancora visibili (specie se la chiesa non è stata restaurata di recente) e quindi risulta molto utile rilevare tali dissesti per una previsione più affidabile della vulnerabilità. Volendo precisare meglio le modalità di compilazione, si deve porre una croce nella casella della prima riga se è presente il macroelemento connesso a quel meccanismo o se si riscontra che tale meccanismo potrebbe attivarsi; ciò significa che vanno sempre segnati i meccanismi 13 e 14, mentre il meccanismo 10 richiede la presenza di un transetto o di cappelle che escono dal profilo delle pareti laterali; il meccanismo 15 presuppone che esistano corpi di fabbrica annessi (sacrestia, monastero, ecc.) di dimensioni comparabili o che siano evidenti fasi costruttive distinte, con soluzioni di continuità nell'apparato murario; il meccanismo 18 va segnalato se è presente una vela o qualche elemento svettante di dimensioni significative che, anche se non strutturale, possa indurre danni alla struttura sottostante a seguito del suo crollo. Nella seconda riga viene invece rilevato l'entità del danno; per meccanismo sviluppato (danno 2) si intende che le lesioni indicano chiaramente la sconnessione della fabbrica in parti con attivazione del cinematismo; il caso di danno grave (danno 3) si riferisce invece, oltre che alle situazioni di crollo locale o globale del macroelemento, ai casi in cui il meccanismo ha prodotto evidenti deformazioni permanenti (fuori piombo, perdita di forma di archi o volte) e la funzionalità strutturale è ridotta in misura significativa. Interessante è il rilievo del danno lieve, caratterizzato da lesioni che non compromettono la struttura ma che avvisano sulla predisposizione all'attivazione del meccanismo. Recenti sviluppi della metodologia (5) hanno evidenziato come sia più opportuno rilevare il danno in funzione di 5 livelli di danno, congruenti con le scale macrosismiche europee e i metodi di I livello per gli edifici ordinari. La possibilità di potere graduare il proprio giudizio su 5 livelli diversi permette, infatti, di poter rilevare la gravità di uno stato fessurativo con maggior accuratezza. Inoltre, in funzione delle rielaborazioni statistiche effettuate sulle chiese umbre-marchigiane, è emerso come un giudizio su più livelli consente di disporre di dati più omogenei, in cui anche il possibile errore, legato all'inevitabile soggettività di giudizio, ha un peso minore sulla valutazione globale della gravità del danneggiamento dell'opera. In tale rilievo, tuttavia, il significato strettamente preventivo dell'analisi, in cui il rilievo del danno ha assunto il significato di una constatazione di un danneggiamento pregresso, si è adottata la distribuzione su tre livelli analoga a quella usata per il rilievo del danno delle chiese danneggiate dal terremoto del 1997. Nella terza riga vengono individuate le carenze costruttive che determinano la vulnerabilità di quel meccanismo; siccome alcune delle informazioni richieste non sono facilmente rilevabili o il tecnico può non sentirsi in grado di esprimere un giudizio (quando l'indicatore è qualitativo), è possibile marcare la risposta negli spazi adiacenti alla dicitura "non so"; in questo caso l'indicatore non verrà tenuto in conto nelle successive elaborazioni. Il carattere preventivo dell'analisi ha portato gli autori ad

investigare, la possibile presenza di stati fessurativi connessi a meccanismi di danno legati all'interazione della struttura con il terreno (cedimenti fondazionali) od alla presenza in sito di fenomeni dovuti alla morfologia ed alla geologia dell'area interessata (movimenti franosi in atto, fratturazioni, liquefazioni). E' apparso importante il rilievo di tali fenomeni, in quanto, anche se in gran parte sconnessi dagli effetti di terremoti passati, possono favorire la formazione di zone di debolezza nella costruzione che influenzano la risposta strutturale in occasione di un sisma. Per tali meccanismi di danno (figura 3.3.1.3) è stato inserito solo il rilievo del danno presente, in quanto risulta improbabile potere valutare vulnerabilità specifiche della chiesa tramite un giudizio qualitativo e speditivo.

4. **Caratteristiche delle murature:** le diverse murature nei vari macroelementi vengono descritte in apposite schede (Allegato 2) facendo riferimento alle caratteristiche degli elementi costitutivi e della malta, alla tessitura dei paramenti ed alla composizione della sezione trasversale; la *scheda murature* rappresenta una sintesi della scheda messa a punto da Binda (6) nell'ambito di una convenzione di ricerca promossa dalla Regione Toscana. Per la compilazione di una scheda è necessario che sia visibile il paramento (ovvero non vi sia intonaco) per almeno un m<sup>2</sup> di superficie; purtroppo il rilievo della sezione trasversale, molto importante per la valutazione della qualità

19	<b>EFFETTI AL SUOLO DOVUTI ALLA MORFOLOGIA E ALLA GEOLOGIA DELL'AREA INTERESSATA</b>	
Danno	EVIDENZA DI EFFETTI AL SUOLO (frane, cedimenti, fratturazione, liquefazione)	
20	<b>EFFETTI AL SUOLO DERIVANTI DA AZIONI MUTUE TRA TERRENO E COSTRUZIONE</b>	
Danno	LESIONI DA CEDIMENTO IN FONDAZIONE <b>Localizzazione :</b>	

Figura 3.3.1.3 - Meccanismi di danno legati all'interazione suolo-struttura

muraria, non è in genere possibile se non in presenza di un danno per crollo o a fronte di indagini parzialmente distruttive. La compilazione della scheda è supportata da un abaco (Allegato 3), che illustra il significato delle diverse terminologie con le quali sono classificate le murature. Per ogni macroelemento possono essere compilate più schede, se sono evidenti diverse fasi o tecniche costruttive; nella scheda chiese è necessario quindi inserire i riferimenti alle schede allegate, seguendo questo criterio: numero della scheda, percentuale di muratura nel macroelemento riferibile alla scheda, spessori minimo e massimo della muratura. In altre parole, se la muratura fosse la stessa in tutta la fabbrica sarebbe necessario compilare un'unica scheda murature e riferirla, con percentuale 100%, a tutti i macroelementi presenti.

5. **Agibilità:** in tale sezione, significativa solo nell'emergenza sismica, è richiesto un giudizio sull'agibilità della struttura, scegliendo fra quattro diverse possibilità: agibile, inagibile, parzialmente agibile, agibile con provvedimenti di pronto intervento. Nel caso di agibilità parziale, il rilevatore deve indicare quale parte della fabbrica ritiene agibile, o meglio quali zone devono essere transennate perché ritenute non fruibili (ad esempio una navata). L'ultima scelta (agibile con provvedimenti di pronto intervento) richiede invece che siano precisati quali sono i provvedimenti ritenuti necessari, a fronte dei quali è possibile ridare immediatamente agibilità alla fabbrica.

6. **Annotazioni:** è uno spazio libero, che può essere utilizzato diversamente a seconda delle finalità della campagna di rilevamento. Nel caso di uso in emergenza è opportuno segnalare la necessità di interventi urgenti per la salvaguardia del bene o della pubblica incolumità; inoltre possono essere indicati danni che inquadrabili nei 16 meccanismi previsti. In generale è utile evidenziare tipologie particolari, non previste nella sezione 1, dissesti di natura non sismica (cedimenti di fondazione) e recenti interventi di consolidamento.

7. **Elaborati grafici:** pianta, prospetti, sezioni e schizzi per meglio chiarire le forme strutturali

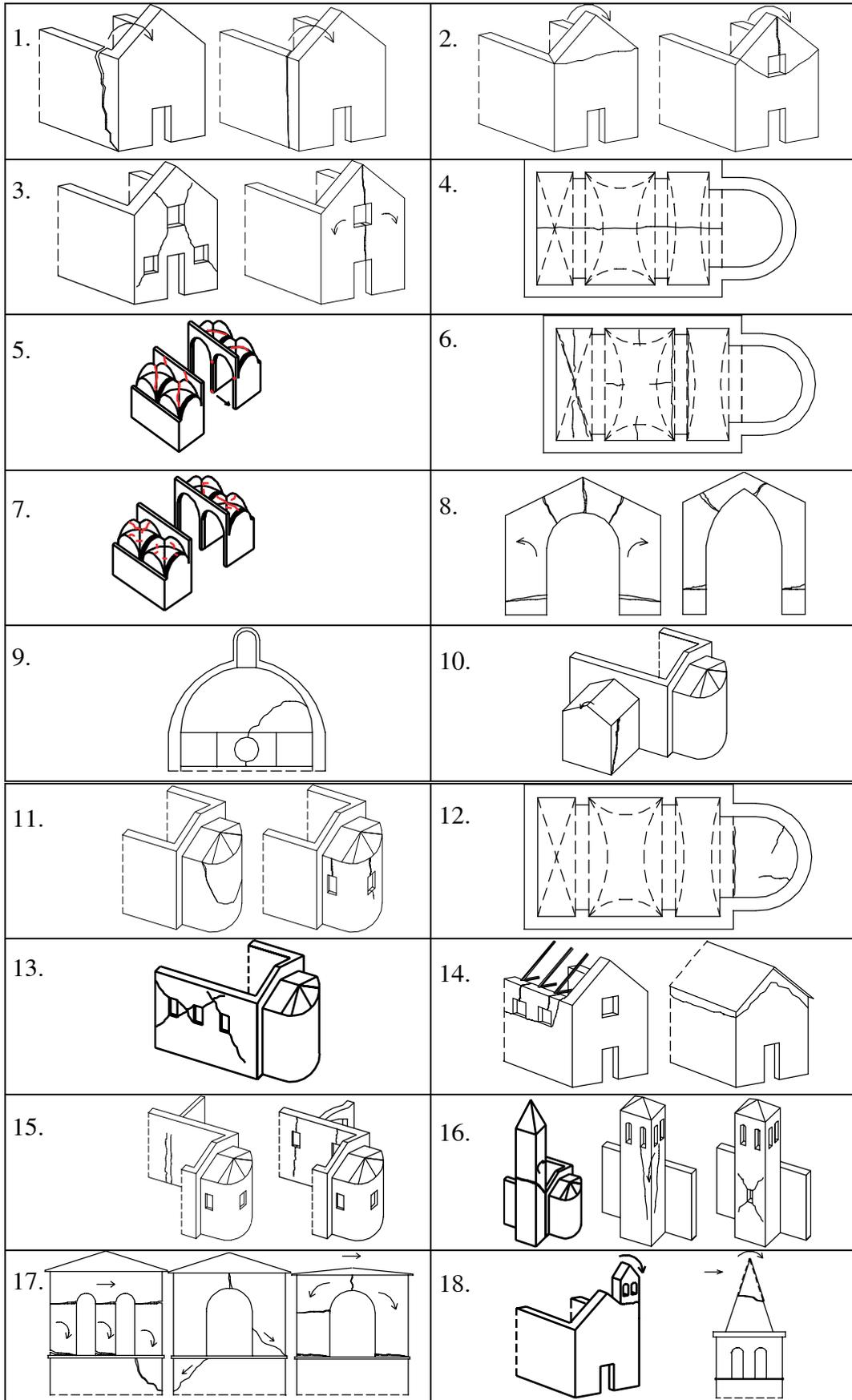


Figura 3.3.1.4 - Abaco dei meccanismi di danno

### Calcolo degli indici e analisi di vulnerabilità

L'elaborazione dei dati rilevati consente di ricavare due distinti indici, attraverso una semplice media normalizzata dei punteggi relativi ai livelli di danno e agli indicatori di vulnerabilità per ciascun meccanismo di collasso:

- **Indice di danno:** è un numero compreso tra 0 e 1 che quantifica il livello medio di danno subito dalla chiesa:

$$i_d = \frac{1}{3N} \sum_{k=1}^{18} d_k \quad (3.3.1.1)$$

dove:  $d_k$  è il livello di danno subito nei riguardi del  $k$ -esimo meccanismo (da 0 a 3);  $N$  è il numero di meccanismi che si sarebbero potuti attivare nella chiesa, secondo quanto indicato nel paragrafo precedente ( $N \leq 18$ ). In questo modo l'indice di danno vale 1 se il livello di danno è risultato grave in tutti i meccanismi possibili. La mancanza di una sempre evidente natura sismica di alcuni stati fessurativi legati all'interazione suolo-struttura ha portato a non considerare nell'indice di danno i due nuovi meccanismi (19 e 20), che forniscono tuttavia un'indicazione utile nella determinazione della vulnerabilità della chiesa.

- **Indice di vulnerabilità:** è un numero compreso tra 0 e 1, rappresentativo della propensione della chiesa ad essere danneggiata dal terremoto, così definito:

$$i_v = \frac{1}{2N - m} \sum_{k=1}^{18} v_k \quad (3.3.1.2)$$

dove:  $v_k$  sono il numero di indicatori di vulnerabilità riscontrati nel  $k$ -esimo meccanismo (da 0 a 2);  $N$  è il numero di meccanismi che potenzialmente potrebbero essere attivati nella chiesa;  $m$  è il numero di indicatori di vulnerabilità per i quali non è stato possibile rilevare l'informazione o formulare un giudizio (per esempio certe zone della fabbrica, come il sottotetto, possono non essere ispezionabili, specie in emergenza). Anche in questo l'indice vale 1 nella situazione peggiore, ovvero quando per tutti gli indicatori a cui si è potuto dare risposta si è riscontrata una vulnerabilità.

Questi indici vengono utilizzati in maniera differente a seconda che si voglia effettuare un'analisi di vulnerabilità sulle chiese di un territorio a fini preventivi o si rilevino i dati a seguito di un terremoto per la gestione dell'emergenza. Ovviamente essi non godono di alcun rigore scientifico o significato meccanico, ma la loro utilità consiste nell'essere parametri sintetici tramite i quali confrontare situazioni differenti, al fine di mettere insieme gruppi di manufatti di caratteristiche analoghe o stabilire gerarchie in funzione dei danni subiti o della vulnerabilità presunta nei riguardi dell'azione sismica.

Nella fase dell'emergenza è utile il solo indice di danno, in quanto la vulnerabilità è direttamente constatata a seguito dell'evento sismico; disporre di un indice di danno strutturale insieme alle altre informazioni raccolte, in particolare l'agibilità, consente di avere un quadro completo ed omogeneo dell'impatto prodotto dall'evento sul territorio e sulla chiese presenti. L'indice di danno risulta quindi utile nel definire le opere di messa in sicurezza (si partirà in genere dalle chiese più danneggiate), nel programmare i primi interventi (per ridare agibilità si comincerà dalle chiese con indice di danno più basso, in quanto la loro inagibilità è probabilmente associata a qualche problema localizzato) e nella pianificazione del recupero definitivo. Nei prossimi paragrafi saranno descritti altri aspetti per i quali la metodologia qui proposta può fornire un supporto nell'emergenza (stima dei costi, indicazioni per il miglioramento sismico).

Volendo invece operare una strategia di prevenzione, come è il caso delle chiese del Molise, l'obiettivo di un'analisi di vulnerabilità è quello di acquisire una conoscenza dei manufatti presenti su un dato territorio, con particolare riferimento alla loro propensione ad essere danneggiati dal sisma (vulnerabilità). Il risultato richiesto può essere a livello territoriale, ovvero stimare lo scenario di danno atteso a seguito di un terremoto di data intensità, o più di dettaglio su ogni singolo manufatto, come supporto ad una strategia di prevenzione sismica attraverso interventi di miglioramento sismico sui diversi manufatti.

#### **Note al paragrafo 3.3.1**

- (1) Giuffrè A. (1991). *Lecture sulla meccanica delle murature storiche*, Edizioni Kappa, Roma
- (2) F. Doglioni, A. Moretti e V. Petrini, *Le chiese e il terremoto*, Edizioni LINT, Trieste, 1994.
- (3) *Archivio delle chiese danneggiate dal terremoto del 1987 - Province di Modena e Reggio Emilia*, CD-Rom a cura di Regione Emilia Romagna, Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (CNR) e Istituto di Ricerca sul Rischio Sismico (CNR), Milano, 1995
- (4) S. Lagomarsino, A. Brencich, F. Bussolino, A. Moretti, L.C. Pagnini, S. Podestà, *Una nuova metodologia per il rilievo del danno alle chiese: prime considerazioni sui meccanismi attivati dal sisma* in *Ingegneria Sismica*, pp. 70-82, 3,1997
- (5) Lagomarsino S., Podestà S., *Metodologia per l'analisi di vulnerabilità delle chiese* Atti del IXConvegno Nazionale in L'Ingegneria Sismica in Italia Torino, 1999
- (6) Binda, *Sperimentazione di tecniche di intervento di miglioramento strutturale su edifici in muratura nei centri storici: indagini in sito ed in laboratorio atte a qualificare le murature in pietra della Lunigiana*, Regione Toscana, Firenze, 1998.