

Patrimonio culturale e rischio sismico

di Livio Fantoni

Mentre stavo preparando queste note di presentazione della “Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche sulle costruzioni”, è giunta notizia del disastroso terremoto che ha colpito la città dell’Aquila, che come tutte le città italiane è ricca di monumenti e di beni culturali. Al momento non è possibile valutare l’entità dei danni subiti dagli edifici storici ma, dalle ancor frammentarie immagini, sembra che le costruzioni più colpite siano state quelle più recenti, presumibilmente progettate e costruite secondo criteri e norme antisismiche ormai in vigore da decenni, che se correttamente applicate avrebbero garantito l’incolumità dei cittadini. Qui viene pubblicato un ampio stralcio della citata Direttiva, riguardante le costruzioni in muratura, per far riflettere sul fatto che un edificio in muratura ben fatto, ben connesso e legato strutturalmente, omogeneo nelle sue parti, non manomesso nel tempo con interventi “innovativi”, è in grado di resistere sufficientemente bene anche a terremoti di forte intensità, come testimoniato da eventi sismici anche lontani nel tempo (San Francisco 1906, Messina 1908). La Direttiva, concertata con il Ministero per i beni e le attività culturali ed il Dipartimento della protezione civile, d’intesa con la Conferenza unificata delle regioni, datata 12 ottobre 2007, è stata pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale del 29 gennaio 2008 ed è entrata in vigore alla fine di aprile 2008. Le finalità ed i criteri della Direttiva vanno a collocarsi nell’ambito della profonda revisione della normativa tecnica italiana per adeguarla al corpus normativo comunitario nel campo delle costruzioni, rappresentato dagli Eurocodici, avvenuta tra il 2003 e il 2008, a seguito di eventi sismici che avevano colpito l’Italia centrale e che già molto avevano impressionato l’opinione pubblica. Contemporaneamente, gli studi sulla sismicità del paese, hanno evidenziato come tutta l’Italia sia esposta al rischio sismico, e che, seppur in gradi diversi, dovunque si debbano applicare criteri di protezione per l’incolumità delle persone, delle cose e degli stessi manufatti. Per quanto riguarda il patrimonio culturale va tuttavia riconosciuto che eventuali interventi di consolidamento o adeguamento antisismico non possono alterare pesantemente la specificità del monumento. Occorre cioè specificare un percorso di conoscenza, valutazione e progettazione degli interventi, che pur seguendo le linee generali, valide per edifici non vincolati, sia opportunamente adattata alle esigenze e peculiarità del patrimonio culturale. Il Codice dei beni culturali e del paesaggio (D.Lvo 22 gennaio 2004), per quanto riguarda i beni tutelati, specifica (art 29, comma 4) che “per i beni immobili situati nelle zone dichiarate a rischio sismico in base alla normativa vigente, il restauro comprende l’intervento di miglioramento strutturale”. La Direttiva individua quindi dei criteri per la valutazione della sicurezza degli edifici esistenti con strumenti ed analisi appropriate e per la successiva progettazione degli interventi di miglioramento. Gli interessati che desiderassero consultare l’intero documento, lo troveranno presso il sito molto aggiornato della Regione Toscana – rischio sismico (www.rete.toscana.it). Tornando all’attualità del momento, parafrasando una frase di Ottone di Bismarck, si può dire che le buone norme applicate da cattivi esecutori sono più dannose di norme, magari meno aggiornate, applicate con intelligenza ed esperienza. Naturalmente ancora meglio è avere sia ottime norme che ottimi operatori e per questo occorre l’impegno congiunto di tutti quelli che si occupano di restauro e riuso dei monumenti.



Castello di Colloredo di Montalbano

DIRETTIVA DEL PRESIDENTE DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI 12 OTTOBRE 2007

DIRETTIVA DEL PRESIDENTE DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI PER LA VALUTAZIONE E LA RIDUZIONE DEL RISCHIO SISMICO DEL PATRIMONIO CULTURALE CON RIFERIMENTO ALLE NORME TECNICHE SULLE COSTRUZIONI.

Publicata sulla Gazzetta Ufficiale del 29 gennaio 2008

1 OGGETTO DELLA DIRETTIVA

- 1.1 Finalità e criteri
- 1.2 Contenuti della direttiva

2 REQUISITI DI SICUREZZA E CONSERVAZIONE

- 1 Strumenti per la valutazione della sicurezza sismica a scala territoriale
- 2.2 Criteri per la valutazione della sicurezza sismica e dell'efficacia dell'intervento
- 2.3 Definizione di stati limite di riferimento per il patrimonio culturale
- 2.4 Livelli di protezione antisismica
- 2.5 Modellazione strutturale, analisi sismica e progetto degli interventi per il miglioramento

3 AZIONE SISMICA

- 3.1 Categorie di terreno di fondazione
- 3.2 Definizione dell'accelerazione orizzontale del terreno
- 3.3 Spettri di risposta
- 3.4 Effetti di sito

4 CONOSCENZA DEL MANUFATTO

- 4.1 Il percorso della conoscenza
 - 4.1.1 Generalità
 - 4.1.2 Identificazione della costruzione
 - 4.1.3 Rilievo geometrico
 - 4.1.4 Analisi storica degli eventi e degli interventi subiti
 - 4.1.5 Il rilievo materico costruttivo e lo stato di conservazione
 - 4.1.6 La caratterizzazione meccanica dei materiali
 - 4.1.7 Terreno e fondazioni
 - 4.1.8 Monitoraggio
- 4.2 Livelli di conoscenza e fattori di confidenza

5 MODELLI PER LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA

- 5.1 Il comportamento sismico delle costruzioni storiche in muratura
- 5.2 Metodi di analisi sismica
 - 5.2.1 Premessa
 - 5.2.2 Analisi statica o cinematica lineare
 - 5.2.3 Analisi dinamica modale
 - 5.2.4 Analisi statica o cinematica non lineare

- 5.2.5 Analisi dinamica non lineare
- 5.3 Livelli di valutazione della sicurezza sismica
 - 5.3.1 LV1: analisi qualitativa e valutazione con modelli meccanici semplificati
 - 5.3.2 LV2: valutazione su singoli macroelementi (meccanismi locali di collasso)
 - 5.3.3 LV3: valutazione complessiva della risposta sismica del manufatto
- 5.4 Modelli di valutazione per tipologie
 - 5.4.1 Premessa
 - 5.4.2 Palazzi, ville ed altre strutture con pareti di spina ed orizzontamenti intermedi
 - 5.4.3 Chiese, oratori ed altre strutture con grandi aule, senza orizzontamenti intermedi
 - 5.4.4 Torri, campanili ed altre strutture a prevalente sviluppo verticale
 - 5.4.5 Ponti in muratura, archi trionfali ed altre strutture ad arco

6 CRITERI PER IL MIGLIORAMENTO SISMICO E TECNICHE DI INTERVENTO

- 6.1 Strategie per la scelta dell'intervento di miglioramento
- 6.2 Influenza degli interventi di adeguamento impiantistico
- 6.3 Operazioni tecniche di intervento
 - 6.3.1 Premesse
 - 6.3.2 Interventi volti a ridurre le carenze dei collegamenti
 - 6.3.3 Interventi volti a ridurre le spinte di archi e volte ed al loro consolidamento
 - 6.3.4 Interventi volti a ridurre l'eccessiva deformabilità dei solai ed al loro consolidamento
 - 6.3.5 Interventi in copertura
 - 6.3.6 Interventi volti ad incrementare la resistenza degli elementi murari
 - 6.3.7 Pilastrini e colonne
 - 6.3.8 Interventi su elementi non strutturali
 - 6.3.9 Interventi in fondazione
- 6.4 Operazioni progettuali
 - 6.4.1 Premesse
 - 6.4.2 Progetto preliminare
 - 6.4.3 Progetto definitivo
 - 6.4.4 Progetto esecutivo

7 QUADRO RIASSUNTIVO DEL PERCORSO DI VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA SISMICA E PROGETTO DEGLI INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO SISMICO

Allegato A - Programma per il monitoraggio dello stato di conservazione dei beni architettonici tutelati
Allegato B - L'analisi strutturale delle costruzioni storiche in muratura
Allegato C - Modello per la valutazione delle vulnerabilità sismiche delle chiese

...omissis...

ALLEGATO B

L'analisi strutturale delle costruzioni storiche in muratura

Al fine della corretta modellazione meccanica di una costruzione storica in muratura, è opportuno conoscere il funzionamento dei diversi elementi che la compongono: il materiale muratura, il suo utilizzo nei diversi elementi costruttivi e le modalità di connessione tra questi nella formazione dell'intera costruzione.

La muratura

La muratura è un materiale composito costituito dall'assemblaggio di elementi, che possono essere naturali (pietre erratiche, a spacco, sbazzate o squadrate) o artificiali (laterizi). Le variabili caratteristiche sono: il materiale costituente gli elementi (pietra, laterizio, terra cruda, ecc., usati anche in modo misto); le dimensioni e la forma degli elementi; la tecnica di assemblaggio (a secco o con giunti di malta); la tessitura, ovvero la disposizione geometrica degli elementi nel paramento murario; ulteriori dettagli (listatura, uso di scaglie, ecc.). La risposta meccanica di questo materiale composito dipende da tutte queste variabili. Gli elementi hanno in genere un comportamento elasto-fragile, con una resistenza a trazione minore rispetto a quella a compressione, ma comunque significativa. La malta presenta un comportamento elasto-fragile in trazione, con resistenza molto inferiore a quella degli elementi ed, in assoluto, molto bassa; in compressione e taglio il suo comportamento è duttile e fortemente non lineare. La risposta meccanica dei giunti è fortemente influenzata dall'attrito e presenta forti non linearità. Le caratteristiche meccaniche della muratura dipendono non solo dai parametri di resistenza e deformabilità dei materiali costituenti, ma anche dai loro valori relativi (in particolare, i diversi moduli elastici degli elementi e della malta).

Nella muratura gli elementi sono disposti per strati successivi, in genere ad andamento orizzontale; ciò determina la formazione di giunti principali continui e di giunti secondari, al contatto tra due elementi adiacenti, discontinui in quanto opportunamente sfalsati (ingranamento). L'orientamento dei giunti principali è in genere ortogonale alle sollecitazioni di compressione prevalenti, al fine di ottimizzare il comportamento della muratura sotto carichi di esercizio. Tuttavia, i giunti principali diventano potenziali piani di discontinuità, con conseguenze sulla resistenza del solido murario, in presenza di sollecitazioni di trazione e taglio dovute all'azione sismica. In questi casi l'attrito, generato sui giunti dalle tensioni normali di compressione associate alle forze inerziali, contribuisce alla resistenza ed alla dissipazione. L'ingranamento nel piano della muratura influisce sul comportamento a taglio; in generale, esso è funzione del rapporto medio tra la base e l'altezza degli elementi e dei criteri di sfalsamento dei giunti secondari. La costituzione della muratura nella sezione influenza la resistenza a compressione e il comportamento fuori dal piano; nel caso di murature a due o più paramenti, parametro è significativa la presenza di elementi passanti che creino una connessione tra i due paramenti esterni (diatoni). La risposta sismica di una struttura in muratura non dipende unicamente dal materiale impiegato, ma anche da diversi aspetti tecnologici, ed in particolare dai collegamenti tra gli elementi strutturali. Le costruzioni storiche in muratura, infatti, sono generalmente costi-

tuite da sistemi più o meno complessi di pareti e orizzontamenti (solai lignei, volte). Le pareti possono essere considerate come elementi strutturali bidimensionali, che per la scarsa resistenza a trazione della muratura presentano una risposta molto diversa ad azioni orizzontali nel piano e fuori dal piano. La qualità della risposta globale è funzione sia del corretto dimensionamento delle pareti sia della capacità del sistema di trasferire le azioni tra tali elementi (connessione tra le pareti verticali; connessione dei solai alle pareti). L'efficacia dei collegamenti tra pareti verticali è principalmente legata all'ammorsamento nelle zone di connessione; inoltre, un contributo significativo può derivare dalla presenza di catene metalliche o di altri dispositivi puntuali. L'efficacia dei collegamenti tra le pareti e i solai è funzione del sistema di appoggio (dimensione della superficie d'appoggio, sagomatura della testa delle travi, connessioni metalliche).

La modellazione strutturale

La modellazione e la verifica delle strutture storiche in muratura è quindi un problema complesso per la difficoltà di considerare adeguatamente la geometria, i materiali e le condizioni di vincolo interno. A tutto questo si aggiunge l'evolversi delle vicende storiche attraverso le quali si è formata e trasformata la costruzione; inoltre, spesso questa è inserita in agglomerati urbani complessi, nei quali è difficile distinguere edifici isolati o unità costruttive strutturalmente autonome. Questo rende problematica la scelta della scala della modellazione ed, inoltre, la definizione dei confini spaziali e dei vincoli della struttura. Il riconoscimento della struttura all'interno della costruzione è particolarmente difficoltoso, in quanto dipende, oltre che dalla sua storia costruttiva, dai carichi applicati e dagli stati di danneggiamento presenti. Quindi, per la definizione di modelli strutturali è spesso necessario disporre di legami costitutivi che considerino il comportamento fortemente non lineare della muratura.

La modellazione strutturale di una costruzione storica in muratura richiede sempre un'approfondita conoscenza (indagine storica, rilievo strutturale e tecnologico, indagini diagnostiche), al fine di scegliere:

- la scala spaziale, ovvero quale parte della costruzione è opportuno modellare;
- lo schema strutturale, che se possibile deve essere riconosciuto o verificato dalle vicende passate;
- il tipo di analisi, condizionato dallo schema strutturale ma anche dalle finalità dell'analisi stessa.

La scelta della scala della modellazione è condizionata da diversi fattori. Nel caso di una costruzione inserita in un contesto di aggregato urbano, sarebbe necessario considerare questo integralmente, ma spesso ciò è improponibile, sia per la difficoltà di accedere e conoscere le parti adiacenti, sia per la complessità e gli oneri computazionali.

Nella definizione dello schema strutturale è opportuno considerare i seguenti fattori: la geometria della struttura; l'interazione tra struttura ed ambiente; le fasi di costruzione e trasformazione; il danneggiamento. L'analisi della geometria tridimensionale della struttura è finalizzata ad individuare possibili simmetrie o direzioni significative per il suo comportamento globale. In base a queste osservazioni, infatti, spesso la struttura può essere notevolmente semplificata e i suoi gradi di libertà ridotti. Spesso

è possibile scegliere sezioni significative della struttura rispetto alle quali svolgere un'analisi piana (es.: la sezione trasversale della navata di una chiesa). Nel caso di strutture simmetriche, è possibile modellare solo una parte della costruzione, pur di assegnare opportune condizioni di vincolo (es.: analisi di metà struttura, nel caso di un sistema arco-piedritto, o di uno spicchio di cupola, grazie alla sua assialsimmetria).

L'interazione tra la struttura e l'ambiente è fondamentale nel caso di costruzioni storiche caratterizzate da un grande rigidezza e massa (è il caso, per esempio, di un arco trionfale); in questi casi può risultare determinante considerare la deformabilità del terreno di fondazione, anche se di ottime caratteristiche, data la notevole rigidezza della struttura.

L'individuazione delle fasi di costruzione e trasformazione (es.: annessioni di nuovi corpi di fabbrica, sovrelevazioni, modifiche interne con demolizioni parziali e ricostruzioni) è fondamentale per due ragioni. In primo luogo gli stati tensionali e deformativi nei diversi elementi dipendono da tale sequenza; tali aspetti possono essere investigati attraverso opportuni metodi di analisi, anche con modelli costitutivi lineari. Inoltre, le parti aggiunte successivamente alla costruzione, anche se appaiono in continuità con il complesso della costruzione, sono spesso strutture in qualche modo indipendenti; è quindi opportuno considerare il corretto grado di collegamento tra le diverse parti del complesso strutturale. In particolare, nel caso degli aggregati complessi nei centri storici, la corretta individuazione delle celle originarie, e distinzione da quelle di accrescimento e di intasamento, consente una più corretta definizione dei vincoli nel modello.

Il riconoscimento dei dissesti presenti nella struttura, attraverso il rilievo del quadro fessurativo e delle deformazioni, è un fattore determinante per la scelta delle strategie di modellazione e di analisi di una costruzione in muratura. Nel caso di stati lesionativi importanti, questi dovranno essere considerati nel modello e, in alcuni casi, la presenza di un meccanismo di dissesto chiaramente riconoscibile, può portare ad identificare il comportamento della costruzione e consentire una modellazione locale di dettaglio.

I metodi di analisi

La complessità delle costruzioni in muratura, costituite da elementi bi e tridimensionali, suggerirebbe il ricorso al metodo degli elementi finiti, in quanto teoricamente in grado di modellare la risposta di geometrie complesse, in condizioni di massima generalità nei vincoli e nei carichi. Nel caso di costruzioni massive è possibile ricorrere ad una modellazione solida tridimensionale degli elementi strutturali; più efficacemente, nel caso frequente di costruzioni costituite da pareti, volte, cupole, risulta spesso conveniente schematizzare la struttura come elementi bidimensionali (con comportamento a piastra o a membrana), in grado di simulare adeguatamente il comportamento nel piano e fuori dal piano. Il comportamento non lineare del materiale costituisce tuttavia un aspetto critico nella modellazione delle costruzioni in muratura.

L'analisi elastica ad elementi finiti può fornire indicazioni utili per una preliminare interpretazione del comportamento. In essa, è indispensabile modellare accuratamente il grado di connessione tra gli elementi (ad esempio, il vincolo interno tra gli ele-

menti di una struttura lignea o tra questi e la struttura muraria di appoggio può essere di difficile identificazione e, in taluni casi, anche unilatero). Inoltre, è opportuno considerare le diverse fasi costruttive della struttura (ad esempio, si pensi allo stato tensionale nella muratura in corrispondenza di una apertura tamponata o in un contrafforte realizzato in fase successiva, come presidio a seguito del manifestarsi di un dissesto). L'analisi elastica presenta in genere zone nelle quali le tensioni principali di trazione sono superiori all'effettiva resistenza a trazione della muratura. Se queste zone sono di limitata ampiezza, la struttura reale probabilmente ivi presenterà una lieve fessurazione (lesioni fisiologiche) e la soluzione fornita dall'analisi elastica ad elementi finiti può essere ritenuta in una certa misura attendibile; se invece è ragionevole attendersi una significativa redistribuzione delle tensioni a seguito della fessurazione, gli stati tensionali e deformativi ottenuti non sono attendibili e risulta necessario procedere ad una modellazione non lineare, nella quale il comportamento del materiale venga simulato con maggiore precisione (danneggiamento, fessurazione, rottura, degrado di rigidezza e resistenza, attrito).

L'analisi elastica ad elementi finiti è quindi utile per descrivere il comportamento strutturale in esercizio, nel caso di una costruzione non soggetta a dissesti significativi, ma non consente di valutare la sicurezza nei riguardi dello stato limite ultimo. Infatti, il raggiungimento di condizioni limite di rottura del materiale a livello locale (stato tensionale puntuale) non può essere messo in alcun modo in relazione alle condizioni limite ultime della struttura, che comportano in genere la perdita di equilibrio di intere porzioni della costruzione.

Tali limitazioni possono essere concettualmente superate attraverso una modellazione non lineare ad elementi finiti, che consideri sia la non linearità del materiale che quella geometrica. Tuttavia, alle già espresse difficoltà di modellazione di una costruzione reale attraverso gli elementi finiti si aggiungono in questo caso la complessità dei legami costitutivi per la muratura e la scarsa robustezza delle procedure di analisi, che fanno sì che la modellazione non lineare possa essere utilizzata solo se si dispone delle necessarie capacità e competenze; per tale ragione essa non può essere uno strumento imprescindibile per la verifica sismica.

Al fine di verificare la sicurezza nei riguardi di una condizione limite di collasso è possibile fare riferimento a metodi di analisi più semplici ed efficaci, che pur se non in grado di descrivere il comportamento in condizioni di esercizio, possono cogliere le condizioni ultime. In particolare, per l'analisi a collasso delle strutture murarie si ricorre frequentemente all'analisi limite dell'equilibrio, utilizzando sia il teorema statico (analisi incrementale) sia quello cinematico (analisi per cinematismi). Il teorema statico, attraverso l'individuazione di soluzioni equilibrate, ci consente di valutare se la costruzione è sicura in presenza di certi carichi, anche se non viene determinata l'esatta soluzione. L'analisi per cinematismi (che considera la struttura come composta da blocchi rigidi), nel caso in cui questi siano correttamente individuati (anche grazie all'osservazione del danno manifestato), ci fornisce in modo molto semplice una stima attendibile delle risorse ultime della costruzione.

Nel caso della muratura, la validità dei due teoremi è stata di-

mostrata con riferimento alle seguenti ipotesi: non resistenza a trazione del materiale, infinita resistenza a compressione, limitata deformabilità, assenza di scorrimenti. Tuttavia è possibile tener conto, con opportuni accorgimenti, anche delle situazioni reali, nelle quali le suddette ipotesi non sono completamente rispettate.

La non resistenza a trazione rappresenta sempre un'ipotesi a favore di sicurezza, ovvero essa porta a sottostimare la reale capacità della struttura. Nel caso in cui i piani di rottura siano scelti in corrispondenza di giunti principali della muratura, essendo questi dotati di resistenza a trazione molto limitata, tale sottostima è relativamente contenuta. Al contrario, nel caso in cui i piani di rottura interessino zone di ammorsamento tra gli elementi della muratura, tale contributo dovrà essere adeguatamente modellato o dovranno essere selezionati piani di minore resistenza, se si vogliono evitare stime eccessivamente cautelative.

L'infinita resistenza a compressione della muratura è invece un'ipotesi a sfavore di sicurezza, in quanto la condizione ultima non si verifica in corrispondenza di un contatto puntuale tra i blocchi (fatto che comporterebbe una tensione di compressione infinita), ma quando la sezione reagente parzializzata è tale da portare alla rottura per schiacciamento della muratura. Tuttavia, l'analisi limite può ancora essere utilizzata, a patto di considerare un margine geometrico nella posizione delle cerniere che definiscono il cinematismo, opportunamente calibrato in funzione della qualità della muratura. La limitata deformabilità è un'ipotesi in genere accettabile, almeno nel caso delle costruzioni in muratura di tipo massivo. L'analisi limite valuta la condizione di equilibrio di una struttura labile, costituita dall'assemblaggio di porzioni murarie rigide, ovvero si controlla che questa risulti staticamente determinata sotto i carichi assegnati, prevalentemente grazie alla propria forma; trascurare la deformabilità significa ipotizzare che anche nella configurazione deformata, non determinabile attraverso l'analisi limite, la struttura sia ancora in equilibrio. È opportuno tuttavia considerare che, nel caso dell'analisi di costruzioni

esistenti, la configurazione geometrica che viene determinata attraverso il rilievo geometrico è già quella deformata, per cui l'analisi limite è in grado di valutare le condizioni di sicurezza nello stato attuale.

Infine, l'assenza di scorrimenti tra i conci murari può essere in genere assunta come ipotesi, salvo poi controllare a posteriori che questi non si verifichino in concomitanza delle azioni che vengono valutate nell'analisi. In genere, ad esclusione di rari casi in cui sono presenti elevati carichi concentrati su strutture di grande spessore, le azioni mutue tra i conci murari sono pressoché perpendicolari ai giunti principali (sedi dei possibili scorrimenti) e comunque all'interno del cono d'attrito relativo alle strutture murarie.

L'analisi limite può essere utilizzata anche per valutare la capacità sismica, considerando tale azione come un sistema di forze orizzontali, proporzionali alle masse della costruzione attraverso un opportuno moltiplicatore. Tale moltiplicatore può essere messo in relazione all'accelerazione massima del suolo. È tuttavia noto che l'accelerazione sismica che attiva il meccanismo di collasso, quella per cui compaiono evidenti fessurazioni ed i diversi blocchi iniziano ad oscillare, è inferiore rispetto a quella che produce il vero e proprio collasso; l'azione sismica ha infatti natura dinamica, per cui un sistema labile di blocchi rigidi, pur oscillando, può tornare nella iniziale configurazione di equilibrio se l'impulso che ha attivato il meccanismo ha durata ed energia limitate, ed i successivi impulsi non sono tali da incrementare ulteriormente gli spostamenti. È quindi possibile valutare la capacità di spostamento del sistema, prima del vero e proprio collasso, facendo riferimento a configurazioni variate del cinematismo; in tale modo viene valutata una vera e propria curva di capacità del sistema, che rappresenta la resistenza offerta dalla struttura al crescere degli spostamenti. Tale metodo di valutazione della risposta sismica è stato introdotto nell'allegato 11.C dell'Ordinanza e può essere preso come riferimento nel caso in cui si vogliono modellare meccanismi locali di collasso.

ALLEGATO C
Modello per la valutazione
della vulnerabilità sismica delle chiese

La metodologia considera 28 meccanismi di danno, elencati nel seguito, associati ai diversi macroelementi che possono essere presenti in una chiesa. Attraverso un opportuno modello, descritto al punto 5.4.3, è possibile valutare un indice di vulnerabilità (5.14) e quindi l'indice di sicurezza sismica della chiesa. In primo luogo è necessario verificare se alcuni macroelementi non sono presenti, ovvero quali meccanismi non si potrebbero verificare nella chiesa a seguito di un sisma, ed a questi assegnare $\rho_k=0$; agli altri dovrebbe essere attribuito il valore $\rho_k=1$, ad eccezione dei meccanismi 4 e 15 ($\rho_k=0.5$) e di alcuni meccanismi (10, 11, 12, 18, 20, 22, 23, 24, 25, 26), nei quali si dovrà scegliere un valore $0.5 < \rho_k < 1$, in relazione all'importanza dell'elemento nel contesto della costruzione.

Per ogni meccanismo vengono suggeriti i possibili elementi di presidio antisismico e gli indicatori di vulnerabilità; a queste liste possono essere aggiunti altri elementi che dovessero emergere, a seguito di una specifica conoscenza della costruzione, come significativi per la valutazione del comportamento sismico della chiesa. A ciascun presidio o indicatore di vulnerabilità rilevato deve essere attribuito, rispettivamente, un grado di efficacia o di gravità, con un punteggio da 1 a 3. Attraverso la tabella 5.1 è possibile ricavare i valori di V_k e V_{kp} da utilizzare in (5.14) per il calcolo dell'indice di vulnerabilità.

1 - RIBALTAMENTO DELLA FACCIATA

Distacco della facciata dalle pareti o evidenti fuori piombo

Presidi antisismici

- Presenza di catene longitudinali
- Presenza di efficaci elementi di contrasto (contrafforti, corpi addossati, altri edifici)
- Ammorsamento di buona qualità tra la facciata ed i muri della navata

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di elementi spingenti (punti di copertura, volte, archi)
- Presenza di grandi aperture nelle pareti laterali in vicinanza del cantonale

2 - MECCANISMI NELLA SOMMITÀ DELLA FACCIATA

Ribaltamento del timpano, con lesione orizzontale o a V – Disgregazione della muratura o scorrimento del cordolo – Rotazione delle capriate

Presidi antisismici

- Presenza di collegamenti puntuali con gli elementi della copertura
- Presenza di controventi di falda
- Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di grandi aperture (rosone)
- Presenza di una sommità a vela di grande dimensione e peso
- Cordoli rigidi, trave di colmo in c.a., copertura pesante in c.a.

3 - MECCANISMI NEL PIANO DELLA FACCIATA

Lesioni inclinate (taglio) – Lesioni verticali o arcuate (rotazione) “Altre fessurazioni o spancamenti

Presidi antisismici

- Presenza di una catena in controfacciata
- Contrasto laterale fornito da corpi addossati; chiesa inserita in aggregato

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di aperture di grandi dimensioni o in numero elevato (anche se tamponate)
- Elevata snellezza (rapporto altezza/larghezza)

4 - PROTIRO - NARTECE

Lesioni negli archi o nella trabeazione per rotazione delle colonne – Distacco dalla facciata – Martellamento

Presidi antisismici

- Presenza di catene
- Presenza di colonne/pilastrini di adeguata dimensione

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di elementi spingenti (archi, volte)

5 - RISPOSTA TRASVERSALE DELL'AULA

Lesioni negli arconi (con eventuale prosecuzione nella volta) – Rotazioni delle pareti laterali – Lesioni a

taglio nelle volte – Fuori piombo e schiacciamento nelle colonne

Presidi antisismici

- Presenza di paraste o contrafforti esterni
- Presenza di corpi annessi adiacenti
- Presenza di catene trasversali

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di pareti con elevata snellezza
- Presenza di volte e archi

6 - MECCANISMI DI TAGLIO NELLE PARETI LATERALI (RISPOSTA LONGITUDINALE)

Lesioni inclinate (singole o incrociate) – Lesioni in corrispondenza di discontinuità nella muratura

Presidi antisismici

- Muratura uniforme (unica fase costruttiva) e di buona qualità
- Presenza di buoni architravi nelle aperture
- Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di grandi aperture o di ampie zone con muratura di limitato spessore
- Cordoli in c.a. molto rigidi, copertura pesante in c.a.

7 - RISPOSTA LONGITUDINALE DEL COLONNATO NELLE CHIESE A PIÙ NAVATE

Lesioni negli archi o negli architravi longitudinali – Schiacciamento e/o lesioni alla base dei pilastrini –

Lesioni a taglio nelle volte delle navate laterali

Presidi antisismici

- Presenza di catene longitudinali
- Presenza di contrafforti in facciata

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di volte pesanti nella navata centrale

- Copertura pesante in c.a., cappe armate di significativo spessore nelle volte

8 - VOLTE DELLA NAVATA CENTRALE

Lesioni nelle volte dell'aula centrale – Sconnessioni delle volte dagli arconi

Presidi antisismici

- Presenza di catene in posizione efficace
- Presenza di rinfianchi o frenelli

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura
- Volte in foglio, specialmente se su campate di grande luce
- Presenza di lunette o interruzioni ed irregolarità nel profilo delle volte

9 - VOLTE DELLE NAVATE LATERALI

Lesioni nelle volte o sconessioni dagli arconi o dalle pareti laterali

Presidi antisismici

- Presenza di catene in posizione efficace
- Presenza di rinfianchi o frenelli

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura
- Volte in foglio, specialmente se su campate di grande luce
- Presenza di lunette o interruzioni ed irregolarità nel profilo delle volte

•

10 - RIBALTAMENTO DELLE PARETI DI ESTREMITÀ DEL TRANSETTO

Distacco della parete frontale dalle pareti laterali – Ribaltamento o disgregazioni del timpano in sommità

Presidi antisismici

- Presenza di catene longitudinali
- Presenza di efficaci elementi di contrasto (contrafforti, corpi addossati, altri edifici)
- Buon collegamento con la copertura (travi-catena, controventi)
- Ammorsamento di buona qualità tra la parete frontale ed i muri laterali
- Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di cordoli rigidi, travi di colmo in c.a., copertura pesante
- Presenza di grandi aperture nella parete frontale (rosone) e/o in quelle laterali
- Presenza di una sommità a vela di grande dimensione

11 - MECCANISMI DI TAGLIO NELLE PARETI DEL TRANSETTO

Lesioni inclinate (singole o incrociate) – Lesioni attraverso discontinuità

Presidi antisismici

- Muratura uniforme (unica fase costruttiva) e di buona qualità
- Presenza di buoni architravi nelle aperture
- Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di cordoli rigidi, copertura pesante
- Presenza di grandi aperture o di ampie zone con muratura di limitato spessore

12 - VOLTE DEL TRANSETTO

Lesioni nelle volte o sconessioni dagli arconi e dalle pareti laterali

Presidi antisismici

- Presenza di catene in posizione efficace
- Presenza di rinfianchi o frenelli

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura
- Volte in foglio, specialmente se su campate di grande luce
- Presenza di lunette o interruzioni ed irregolarità nel profilo delle volte

13 - ARCHI TRIONFALI

Lesioni nell'arco – Scorrimento di conci – Schiacciamento o lesioni orizzontali alla base dei piedritti

Presidi antisismici

- Pareti di contrasto efficaci (basso rapporto luce/larghezza aula, transetto, altri corpi di fabbrica)
- Presenza di una catena in posizione efficace
- Conci di buona fattura e/o adeguato spessore dell'arco

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di copertura pesante in c.a.
- Presenza di cupola o tiburio

14 - CUPOLA - TAMBURO/TIBURIO

Lesioni nella cupola (ad arco) con eventuale prosecuzione nel tamburo

Presidi antisismici

- Presenza di una cerchiatura esterna, anche a più livelli
- Presenza nel tamburo di contrafforti esterni o paraste
- Cupola direttamente impostata sugli archi trionfali (assenza del tamburo)

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di grandi aperture nel tamburo
- Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura

15 - LANTERNA

Lesioni nel cupolino della lanterna – Rotazioni o scorrimenti dei piedritti

Presidi antisismici

- Presenza di catene o di una cerchiatura esterna
- Presenza di paraste o contrafforti
- Dimensioni contenute rispetto a quelle della cupola

Indicatori di vulnerabilità

- Lanterna di elevata snellezza, con grandi aperture e piccoli pilastri

16 - RIBALTAMENTO DELL'ABSIDE

Lesioni verticali o arcuate nelle pareti dell'abside – Lesioni verticali negli absidi poligonali – Lesione ad U negli absidi semicircolari

Presidi antisismici

- Presenza di cerchiatura (semicircolare e poligonale) o catene (rettangolare)
- Presenza di efficaci elementi di contrasto (contrafforti, corpi addossati)
- Presenza di copertura controventata, non spingente

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di un forte indebolimento per la presenza di aperture (anche tamponate) nelle pareti
- Presenza di volte spingenti
- Cordoli rigidi, copertura pesante, puntoni di falda in c.a

17 - MECCANISMI DI TAGLIO NEL PRESBITERIO O NELL'ABSIDE

Lesioni inclinate (singole o incrociate) – Lesioni in corrispondenza di discontinuità murarie

Presidi antisismici

- Muratura uniforme (unica fase costruttiva) e di buona qualità
- Presenza di buoni architravi nelle aperture
- Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di cordoli rigidi, copertura pesante
- Presenza di grandi aperture o di ampie zone con muratura di limitato spessore

18 - VOLTE DEL PRESBITERIO O DELL'ABSIDE

Lesioni nelle volte o sconnessioni dagli arconi o dalle pareti laterali

Presidi antisismici

- Presenza di catene in posizione efficace
- Presenza di rinfianchi o frenelli

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura
- Volte in foglio, specialmente se su campate di grande luce
- Presenza di lunette o interruzioni ed irregolarità nel profilo delle volte

19 - MECCANISMI NEGLI ELEMENTI DI COPERTURA - PARETI LATERALI DELL'AULA

Lesioni vicine alle teste delle travi lignee, scorrimento delle stesse – Sconnessioni tra cordoli e muratura – Movimenti significativi del manto di copertura

Presidi antisismici

- Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)
- Presenza di collegamenti delle travi alla muratura
- Presenza di controventi di falda (tavolato incrociato o tiranti metallici)
- Presenza di buone connessioni tra gli elementi di orditura della copertura

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di copertura staticamente spingente
- Presenza di cordoli rigidi, copertura pesante

20 - MECCANISMI NEGLI ELEMENTI DI COPERTURA - TRANSETTO

Lesioni vicine alle teste delle travi lignee, scorrimento delle stesse – Sconnessioni tra i cordoli e muratura –

Movimenti significativi del manto di copertura

Presidi antisismici

- Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)
- Presenza di collegamenti delle travi alla muratura
- Presenza di controventi di falda (tavolato incrociato o tiranti metallici)
- Presenza di buone connessioni tra gli elementi di orditura della copertura

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di copertura staticamente spingente
- Presenza di cordoli rigidi, copertura pesante

21 - MECCANISMI NEGLI ELEMENTI DI COPERTURA - ABISDE E PRESBITERIO

Lesioni vicine alle teste delle travi lignee, scorrimento delle stesse – Sconnessioni tra i cordoli e muratura – Movimenti significativi del manto di copertura

Presidi antisismici

- Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)
- Presenza di collegamenti delle travi alla muratura
- Presenza di controventi di falda (tavolato incrociato o tiranti metallici)
- Presenza di buone connessioni tra gli elementi di orditura della copertura

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di copertura staticamente spingente
- Presenza di cordoli rigidi, copertura pesante

22 - RIBALTAMENTO DELLE CAPPELLE

Distacco della parete frontale dalle pareti laterali

Presidi antisismici

- Presenza di efficaci elementi di contrasto (contrafforti, edifici addossati)
- Presenza di cerchiatura o incatenamento
- Ammorsamento di buona qualità tra la parete frontale ed i muri laterali

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di forte indebolimento per la presenza di aperture nelle pareti

23 - MECCANISMI DI TAGLIO NELLE PARETI DELLE CAPPELLE

Lesioni inclinate (singole o incrociate) – Lesioni in corrispondenza di discontinuità murarie

Presidi antisismici

- Muratura uniforme (unica fase costruttiva) e di buona qualità
- Presenza di buoni architravi nelle aperture
- Presenza di cordoli leggeri (metallici reticolari, muratura armata, altro)

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di cordoli rigidi, copertura pesante
- Presenza di grandi aperture (anche tamponate), muratura di limitato spessore

24 - VOLTE DELLE CAPPELLE



Lesioni nelle volte o sconnessioni dalle pareti laterali

Presidi antisismici

- Presenza di catene in posizione efficace
- Presenza di rinfianchi o frenelli

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di carichi concentrati trasmessi dalla copertura
- Volte in foglio, specialmente se molto ribassate
- Presenza di lunette o interruzioni ed irregolarità nel profilo delle volte

25 - INTERAZIONI IN PROSSIMITÀ DI IRREGOLARITÀ PLANO-ALTIMETRICHE

Movimento in corrispondenza di discontinuità costruttive - Lesioni nella muratura per martellamento

Presidi antisismici

- Presenza di un'adeguata connessione tra le murature di fasi diverse
- Presenza di catene di collegamento

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di un'elevata differenza di rigidità tra i due corpi
- Possibilità di azioni concentrate trasmesse dall'elemento di collegamento

26 - AGGETTI (VELA, GUGLIE, PINNACOLI, STATUE)

Evidenza di rotazioni permanenti o scorrimento – Lesioni

Presidi antisismici

- Presenza di perni di collegamento con la muratura o elementi di ritegno
- Elementi di limitata importanza e dimensione
- Muratura monolitica (a conci squadrate o comunque di buona qualità)

Indicatori di vulnerabilità

- Elementi di elevata snellezza
- Appoggio in falso sulle murature sottostanti in falso
- Posizione asimmetrica rispetto all'elemento sottostante (specie se l'oggetto ha notevole massa)

27- TORRE CAMPANARIA

Lesioni vicino allo stacco dal corpo della chiesa – Lesioni a taglio o scorrimento – Lesioni verticali o arcuate (espulsione di uno o più angoli)

Presidi antisismici

- Muratura uniforme (unica fase costruttiva) e di buona qualità
- Presenza di catene ai diversi ordini
- Presenza di adeguata distanza dalle pareti della chiesa (se adiacente)
- Presenza buon collegamento con le pareti della chiesa (se inglobata)

Indicatori di vulnerabilità

- Presenza di aperture significative su più livelli
- Vincolo asimmetrico sulle murature alla base (torre inglobata)
- Appoggio irregolare a terra della torre (presenza di archi su alcuni lati, pareti a sbalzo)

28 - CELLA CAMPANARIA

Lesioni negli archi – Rotazioni o scorrimenti dei piedritti

Presidi antisismici

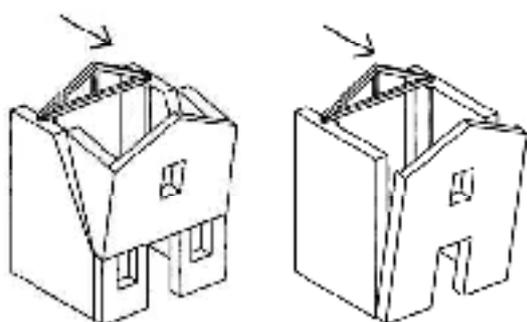
- Presenza di piedritti tozzi e/o archi di luce ridotta
- Presenza di catene o cerchiature

Indicatori di vulnerabilità

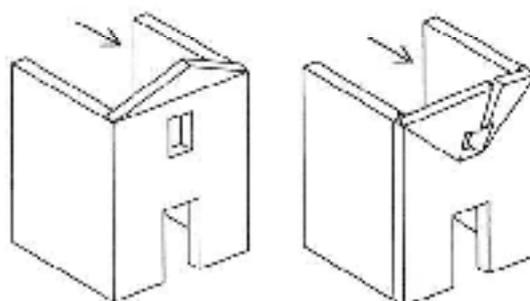
- Presenza di copertura pesante o di altre masse significative
- Presenza di copertura spingente

ABACO DEI MECCANISMI DI COLLASSO DELLE CHIESE

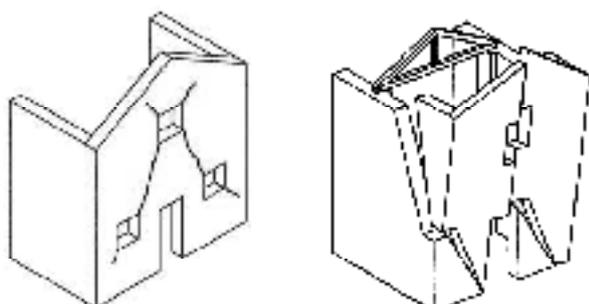
1. RIBALTAMENTO DELLA FACCIATA



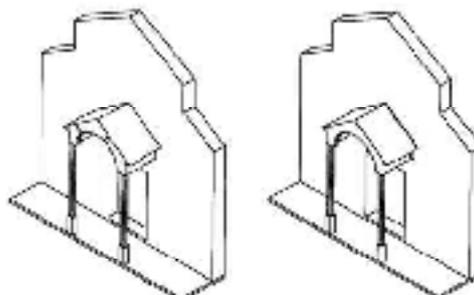
2. MECCANISMI NELLA SOMMITÀ DELLA FACCIATA



3. MECCANISMI NEL PIANO DELLA FACCIATA



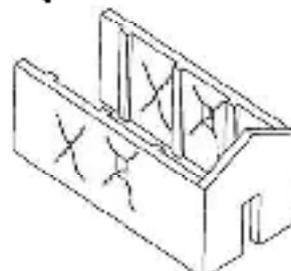
4 - PROTIRO - NARTICE



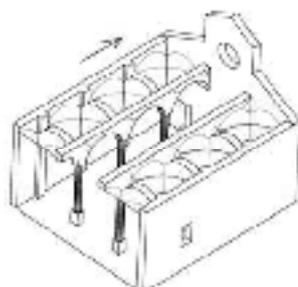
5 - RISPOSTA TRASVERSALE DELL'AULA



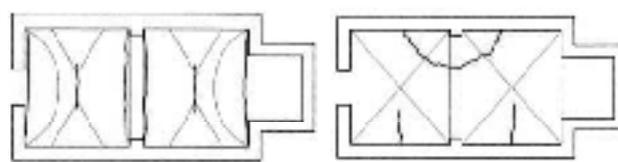
6 - MECCANISMI DI TAGLIO NELLE PARETI LATERALI (RISPOSTA LONGITUDINALE)



7 - RISPOSTA LONGITUDINALE DEL COLONNATO



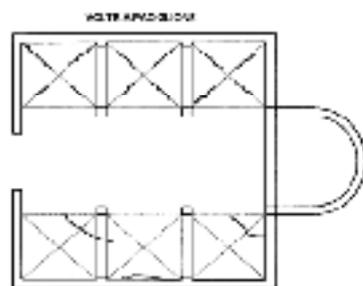
8 - VOLTE DELLA NAVATA CENTRALE



VOLTA A BOTTE LUNETTATA

VOLTA A CROCIERA

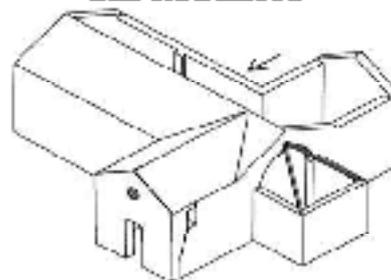
9 - VOLTE DELLE NAVATE LATERALI

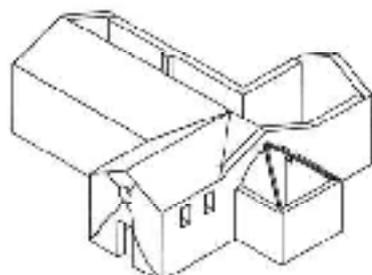
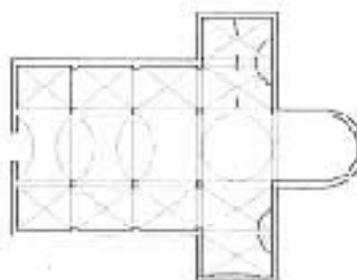
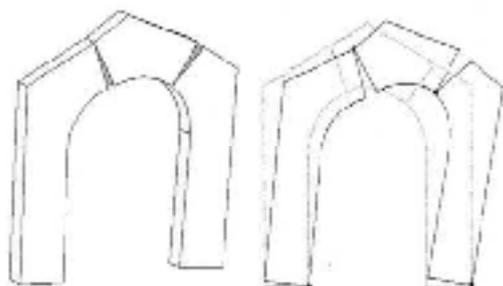
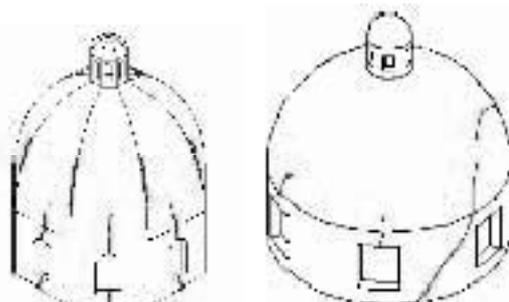
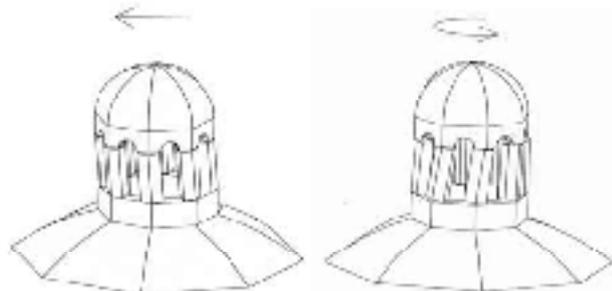
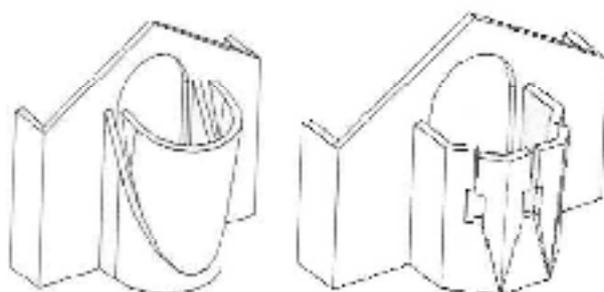
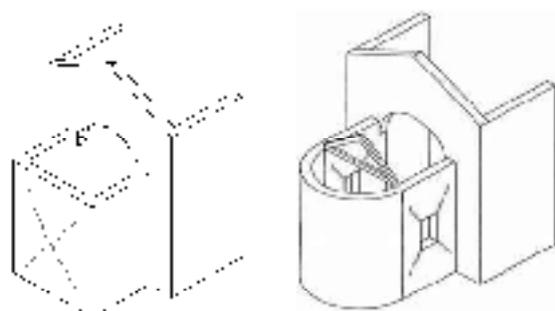
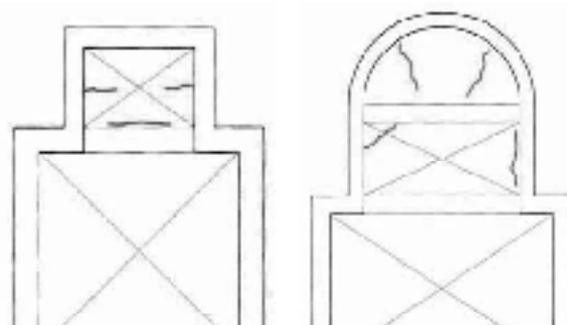
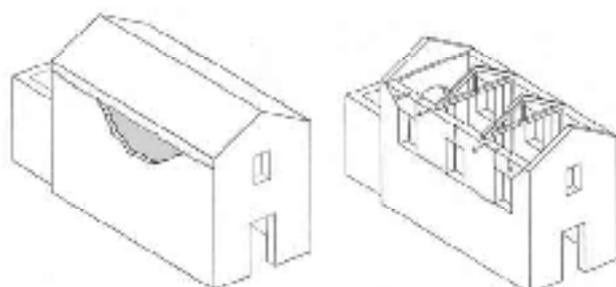
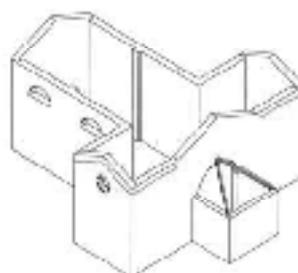


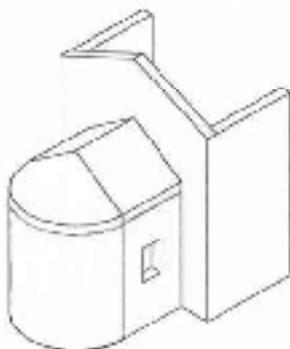
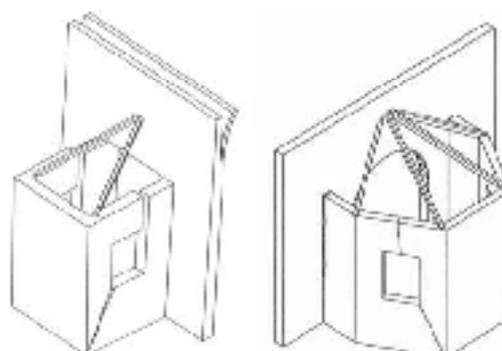
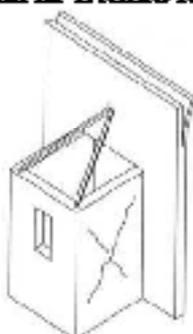
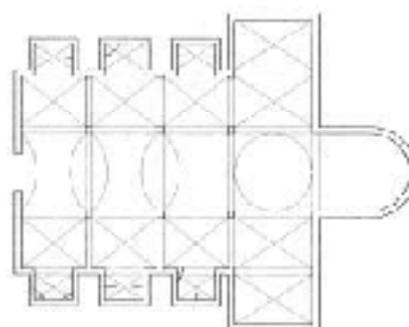
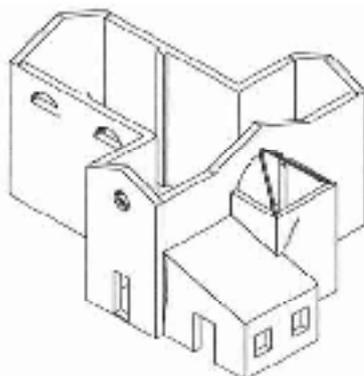
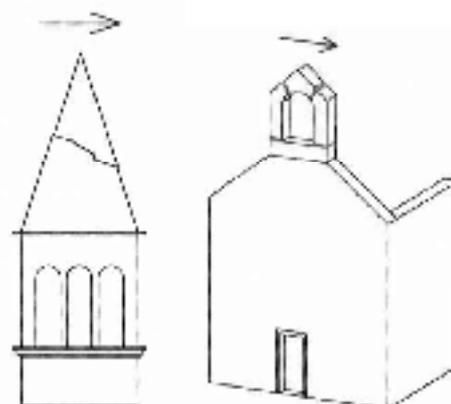
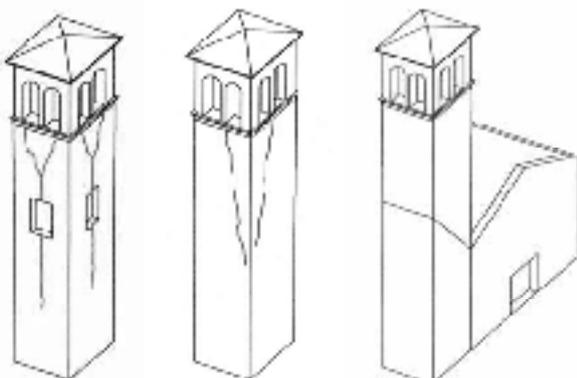
VOLTA A BOTTE

VOLTA A CROCIERA

10 - RIBALTAMENTO DELLE PARETI DI ESTREMITÀ DEL TRANSETTO



11 - MECCANISMI DI TAGLIO NELLE PARETI DEL TRANSETTO**12 - VOLTE DEL TRANSETTO****13 - ARCHI TRIONFALI****14 - CUPOLA - TAMBURO / TIBURIO****15 - LANTEANA****16 - RIBALTAMENTO DELL'ABSIDE****17 - MECCANISMI DI TAGLIO NEL PRESBITERIO O NELL'ABSIDE****18 - VOLTE DEL PRESBITERIO O DELL'ABSIDE****19 - ELEMENTI DI COPERTURA: AULA****20 - ELEMENTI DI COPERTURA: TRANSETTO**

21 - ELEMENTI DI COPERTURA: ABSIDE**22 - RIBALTAMENTO DELLE CAPPELLE****23 - MECCANISMI DI TAGLIO NELLE CAPPELLE****24 - VOLTE DELLE CAPPELLE****25 - INTERAZIONI IN PROSSIMITA' DI
IRREGOLARITÀ PLANO-ALTIMETRICHE****26 - AGGETTI (VELA, GUGLIE, PINNACOLI, STATUE)****27 - TORRE CAMPANARIA****28 - CELLA CAMPANARIA**