

RENATA CODELLO,^(a) ALBERTO LIONELLO^(b)

VENEZIA CITTÀ RESILIENTE: TEMI ED ESPERIENZE

ABSTRACT. – A seguito dei recenti terremoti si è sviluppata, negli ultimi anni, l'attività di miglioramento / adeguamento degli edifici storici. Le verifiche vengono sviluppate impiegando sofisticati modelli matematici che però spesso sottovalutano le qualità strutturali delle fabbriche antiche. Le esperienze di carattere interdisciplinare, fatte a Venezia negli ultimi dieci anni, forniscono importanti contributi per migliorare ed affinare i percorsi di verifica della vulnerabilità sismica. Lo studio materiale del manufatto e il suo comportamento nel tempo è fondamentale per una corretta analisi strutturale: trascurare una lesione può comportare una diversa distribuzione delle tensioni con differenze anche di un ordine di grandezza. Il confronto tra la distribuzione teorica delle sollecitazioni, risultata dalla elaborazione strutturale, e il reale quadro fessurativo dell'edificio fornisce indicazioni fondamentali circa la rappresentatività del modello. Questo ci permette di evitare pesanti opere di irrigidimento con impatti insostenibili sul patrimonio storico privilegiando interventi minimi che non contrastano con il comportamento strutturale originario.

PREMESSA

Il concetto di miglioramento della vulnerabilità sismica dei beni culturali è stato introdotto negli ultimi decenni quando l'ingegneria civile ha riscontrato che i sistemi di controllo e le norme vigenti erano del tutto inadeguate a rilevare lo stato degli edifici storici. Ideato come un percorso alternativo di verifica, viene spesso però interpretato come una deroga alla verifica numerica e quindi, di fatto, diventa un fattore riduttivo della sicurezza. Dagli esperti del restauro si sente spesso parlare di punto di equilibrio tra esigenze di sicurezza e di conservazione; ma si può rinunciare alla sicurezza dei nostri ragazzi solo perché vanno a scuola in un immobile storico o promuovere la valorizzazione di un museo che si trova in un palazzo non verificato? Si ritiene che la questione vada affrontata diversamente.

Le esperienze in questo settore, fatte a Venezia negli ultimi anni, possono portare un significativo contributo. Il centro storico della città lagunare

^(a) Segretario regionale del MiBact per il Veneto.

^(b) MiBACT Soprintendenza Belle Arti e Paesaggio di Venezia e laguna.

è classificato come zona 4, quindi a bassa sismicità, ma la condizione strutturale degli edifici è complessa. Le fabbriche veneziane, in linea generale, presentano meccanismi di danno importanti innescati da cedimenti di fondazione non uniformi che le strutture murarie in elevato registrano con molta evidenza. All'interno della stessa fabbrica o in fabbriche adiacenti si sono registrati cedimenti differenziali di cm 20/30 che nelle fabbriche più importanti hanno raggiunto anche cm 50/60; ne deriva che molti edifici sono interessati da notevoli strapiombi, sconnessioni murarie, lesioni e questo potrebbe costituire un forte rischio per la conservazione e la sicurezza dell'intero patrimonio edilizio della città. Dunque Venezia è un campo di studio e di sperimentazione straordinario dato che, per la sua natura costruttiva obbliga a ragionare in termini di "Resilienza storica". Al contempo si deve registrare l'approccio anche del MiBACT, sempre più pressante ed esteso uniformemente su tutto il territorio nazionale, che prescrive gli interventi del cosiddetto miglioramento sismico in tutti gli edifici storici importanti che siano oggetto di interventi di ristrutturazione. Tra questi spiccano le fabbriche che ospitano attività pubbliche: scuole, ospedali, uffici, musei.

Eppure, non sono lontani gli anni in cui sono state svolte le fondamentali ricerche di studiosi della storia e della scienza delle costruzioni quali Edoardo Benvenuto, Salvatore D'Agostino e Antonino Giuffrè, che avevano radicalmente innovato l'approccio agli studi delle strutture antiche, elaborando analisi e verifiche sui beni culturali, ivi compresi quelli sottoposti a fenomeni sismici, capaci di valorizzare le qualità statiche delle fabbriche antiche e perciò di riconsiderare anche la loro resistenza alle sollecitazioni sismiche. Con l'adozione di adeguati metodi analitici, è possibile verificare, ad esempio, che una delle più straordinarie fabbriche realizzate da Andrea Palladio, nel convento di Santa Maria della Carità a Venezia – sede delle Gallerie dell'Accademia - ha bisogno di interventi davvero minimi per rispondere ai requisiti di un buon miglioramento sismico. In questo caso, come in numerose altre architetture di analoghe qualità costruttive, i tradizionali criteri di irrigidimento impiegati in ingegneria, creerebbero un impatto strutturale insostenibile per la fabbrica cinquecentesca con esiti incerti anche ai fini dell'efficacia complessiva dell'intervento dato che ne risulterebbe un evidente contrasto con il sistema delle fondazioni e le peculiari caratteristiche del sottosuolo lagunare.

Gli obiettivi da perseguire paiono, dunque, già indicati laddove gli sforzi di coordinamento interdisciplinare, posti in campo all'indomani degli eventi sismici soprattutto dalle più importanti università italiane, oltre che dalle istituzioni e dal MiBACT, possono raggiungere risultati molto più rilevanti se paragonati a quelli già acquisiti, sia indagando i temi di natura scientifica che nella proposizione di strumenti e metodi di nuova generazione per la definizione di procedimenti tecnici e applicativi.

Occorre che lo schema di applicazione delle normative antisismiche sia superato da esempi virtuosi che escludano gli errori già fatti in passato. Quando la quantità e la qualità degli interventi di ri-costruzione, in città come L'Aquila, o nelle vaste zone terremotate dell'Emilia, richiedono sforzi che investono più generazioni e soprattutto esigono grandi risorse sia di natura intellettuale che di impegno economico per la collettività, pare necessario ripensare anche procedure e pratiche già sperimentate in passato. Una rinnovata azione di tipo progettuale dovrebbe considerare la capacità di rigenerare ciò che resta dopo la distruzione del sisma integrandola nella ideazione e realizzazione degli interventi, anche e soprattutto quando si tratta di ri-costruzione degli edifici storici, superando l'idea che un'azione così radicale sia rappresentata quasi esclusivamente dal recupero dell'immagine storica. Se oggi si può disporre di numerosi dati desunti dalle campagne di analisi e dallo studio della materia stratificata del monumento, occorre valorizzare al meglio l'azione progettuale, favorendo le azioni di sintesi e assegnando anche maggiori responsabilità ai progettisti. L'applicazione di una grande capacità analitica, maturata in questi anni, non può essere motivo di impedimento, ma fonte di un miglioramento operativo che riguarda le tecniche, i metodi e i tempi di attuazione dei piani d'intervento. Forse è proprio questo il momento in cui l'attività progettuale può superare lo standard costituito dalla sommatoria delle diverse attività specialistiche per configurarsi come un esito inclusivo dei diversi saperi disciplinari.

L'EVOLUZIONE DELLA NORMATIVA

La normativa italiana prevedeva per gli edifici esistenti l'adeguamento alle prescrizioni dettate per le nuove costruzioni; la norma, fin dalle sue origini, era stata pensata per gli edifici in cemento armato e acciaio e non per quelli in muratura. I sismi dell'Umbria e dell'Abruzzo hanno chiaramente indicato che gli interventi di adeguamento per gli edifici storici in muratura sono inefficaci e dannosi. È stato allora introdotto per i beni culturali il concetto di miglioramento che prevede la possibilità di percorsi di verifica più virtuosi ed approfonditi che possono anche derogare dal risultato numerico a condizione che sia verificata, da parte del tecnico, una sicurezza equivalente, come per esempio previsto dalla normativa antincendio.

Si ritiene utile richiamare la definizione di *adeguamento* come allineamento alla norma e quella di *miglioramento* come cambiamento in meglio⁽¹⁾ per comprendere come quest'ultimo sia una attività di più ampio spettro con

⁽¹⁾ Definizioni tratte da Vocabolario della lingua italiana Zingarelli 2011.

obiettivi ben più elevati. E non può che essere così trattandosi di beni culturali che costituiscono una delle fondamentali ricchezze del nostro paese. Il Codice dei beni culturali⁽²⁾ prescrive la conservazione dei beni e ne auspica la loro fruizione: in mancanza di sicurezza non assolviamo a nessuna delle due missioni.

Le maggiori perdite di beni culturali, sia immobili che mobili, si sono registrate in occasione degli eventi sismici e non è possibile pensare ad una ampia fruizione degli edifici, e di quanto in essi contenuto, se non sono sicuri. Si ritiene quindi che l'obiettivo del miglioramento debba essere ricercato superando i requisiti richiesti dalla norma fino ai valori più alti compatibili con la conservazione.

La deroga alla verifica numerica è stata introdotta per le evidenti difficoltà nello studio degli edifici in muratura che non riesce a tener conto delle enormi potenzialità delle strutture storiche che non riusciamo ancora a misurare. Conferma di questo viene dall'analisi delle conseguenze degli eventi sismici ove edifici in muratura, costruiti con la regola dell'arte che ne garantisce il comportamento complessivo, hanno fornito risposte ben superiori a quanto calcolato teoricamente. La prova del tempo vale più di qualsiasi collaudo e i segni lasciati dagli eventi dannosi, quadri fessurativi e deformativi, costituiscono gli elementi più importanti per la valutazione della sicurezza dell'edificio.

LA VULNERABILITÀ DEI CAMPANILI VENEZIANI

Le particolarità costruttive di una struttura a torre implicano la concentrazione di grosse masse e determinano la presenza di importanti sollecitazioni nei materiali; in particolare in fondazione, causa la difficoltà di allargare il basamento, le tensioni indotte nei terreni sono notevoli e hanno comportato nell'area veneziana lo sviluppo di importanti cedimenti e strapiombi dei campanili che, nei casi più gravi, raggiungono anche il 5% dell'altezza. Fonti storiche riportano che i campanili nelle epoche passate erano in maggior numero, rispetto al centinaio di oggi, e che demolizioni ma anche crolli hanno causato la scomparsa di molti di essi. L'ultimo, ma più importante crollo avvenuto, è quello del campanile di S. Marco il 12 luglio 1902.

Per aumentare la conoscenza sull'efficienza strutturale e sullo stato di conservazione dei campanili la Sovrintendenza di Venezia nel 2005 ha ritenuto importante avviare una schedatura di ottantacinque torri per identificare i casi e le situazioni maggiormente a rischio. Sono stati analizzate le

⁽²⁾ Decreto Legislativo n.42/2004 e succ. int. e mod.

tipologie, le geometrie, le caratteristiche dei materiali, il grado di conservazione, il dissesto, i dati storici d'archivio.

Sulla base di questa banca dati sono stati sviluppati due studi paralleli⁽³⁾. Il primo ha riguardato la determinazione del grado di vulnerabilità generale di ogni singola struttura a torre, basato su dati certi ed obiettivi ricavati dalla schedatura, ed espresso con indici sintetici; per la determinazione della vulnerabilità sono stati considerati tutti i fattori, instabilizzanti o stabilizzanti, che sono stati correlati tra loro. Il secondo dalla verifica del rischio sismico effettuata secondo quanto previsto dalle normative allora vigenti⁽⁴⁾; per la conoscenza del manufatto si è ancora fatto riferimento alla schedatura precedentemente effettuata.

Il carattere metodologico delle due verifiche era diverso e si poneva obiettivi differenti; in entrambi i casi si trattava comunque di pervenire ad una valutazione di sicurezza partendo da un campione reale ed usufruendo degli stessi dati di partenza. Questo ha offerto un'ottima opportunità per fare delle considerazioni sui risultati e sulle procedure di elaborazione dei dati. La vulnerabilità di una struttura a torre è intrinseca nella sua struttura e dipende dallo stato di conservazione. La variabilità dei risultati ritrovati dai due studi e la conoscenza approfondita di un campione di dieci campanili sui quali sono stati effettuati degli approfondimenti ci permette di fare le seguenti considerazioni particolarmente interessanti per la valutazione del rischio sismico.

La determinazione dei parametri meccanici delle murature, basata sui risultati delle prove in situ, amplificati o diminuiti dai coefficienti relativi a *malta buona, giunti sottili, connessione trasversale e nucleo scadente* come previsto dalle NTC 2008 non risulta esaustiva per rappresentare la realtà delle torri veneziane con murature molto eterogenee e danneggiate. Si ritiene opportuno l'integrazione dell'algoritmo di calcolo con tre ulteriori parametri:

- Le caratteristiche, le dimensioni e l'omogeneità degli elementi: più aumentano le misure dei mattoni maggiore è il comportamento unitario del muro.
- La presenza di sostituzioni murarie: gli interventi di scuci cucì comportano una redistribuzione delle tensioni nella muratura che difficilmente si riconfigurano in modo omogeneo, risulta in ogni caso difficile un comportamento unitario tra le varie parti sostituite.

⁽³⁾ A. Lionello (a cura di) *Tecniche costruttive, dissesti e consolidamenti dei campanili di Venezia*, Venezia 2011.

⁽⁴⁾ Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale, 2006

- La presenza diffusa di lesioni verticali: le fessurazioni separano le varie parti murarie facendole funzionare come elementi colonnari separati gli uni dagli altri.

Pochi sono i campanili del centro storico di Venezia nei quali non sono attualmente rilevabili dissesti o lesioni; tutte le altre torri presentano fenomeni di dissesto più o meno marcati che si rende necessario siano tenuti in debito conto nella redazione delle verifiche strutturali. Nel caso dei campanili veneziani ipotizzare la struttura integra porta a livelli di sicurezza troppo elevati e risulta doveroso l'impiego di modelli che tengano conto delle modifiche dei comportamenti strutturali conseguenti ai danni e ai dissesti subiti nel tempo. Particolarmente significativa al proposito è il differente comportamento strutturale di una torre ipotizzata integra o lesionata; situazione che si riscontra frequentemente a Venezia ove fessurazioni verticali si formano tra le finestre allineate del fusto. Ad esempio per una stessa torre di sezione quadrangolare cava di m 5 di lato e di m 1 di spessore alta m 20 la massima forza sismica sopportabile, senza che intervengano tensioni di trazione, è di 0,113 g, con struttura integra; se la struttura presenta una lesione centrale la resistenza si dimezza a 0,046 g e con lesione laterale diminuisce a 0,017 g.

Un'ulteriore considerazione può essere fatta relativamente ai meccanismi di danno. I campanili storici hanno subito la prova del tempo, una sorta di collaudo data dagli eventi fisici ed atmosferici che hanno sollecitato le strutture. L'analisi puntuale e la rilevazione dei quadri fessurativi permette di identificare i meccanismi che si sono innescati nel tempo o che sono attualmente attivi, indirizza le verifiche meccaniche sui fenomeni maggiormente pericolosi e dirige verso gli interventi di consolidamento più opportuni.

La comparazione dei risultati dei due diversi studi risulta quindi molto interessante e conferma che, qualora si mettono in gioco tutti gli elementi ricavati dalla fase di analisi, si perviene a verifiche che convergono verso esiti e considerazioni comuni.

GLI INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO/ADEGUAMENTO SUL TERRITORIO VENEZIANO

Il centro storico di Venezia è classificato come zona sismica 4 e le azioni conseguenti sono ridotte; risulta comunque interessante fare qualche riflessione su come viene affrontato il problema dell'adeguamento o del miglioramento del patrimonio storico. La fase di conoscenza viene di solito ben sviluppata ma spesso poco e mal utilizzata nella verifica strutturale. Vengono abitualmente considerate vite nominale pari o inferiori a 50 anni, benché si stia lavorando su beni culturali a cui dovremmo garantire

una durata illimitata, e progettati interventi di scarso miglioramento che non si proiettano verso l'adeguamento. Tutto questo è previsto dalla norma ma è in netto contrasto con la realtà dei fatti in quanto per scarsità di fondi sarà difficile intervenire nei prossimi cinquant'anni e gli edifici storici assumono funzioni sempre più importanti per le quali sarebbe necessaria una adeguata sicurezza.

A tal proposito risulta importante l'esperienza fatta sugli ultimi interventi realizzati sugli edifici storici dell'Arsenale di Venezia dove è previsto l'insediamento della gestione del sistema Mo.S.E.. Le Tese del Comparto della Novissima sono caratterizzate da tipologie costruttive e caratteristiche dimensionali analoghe differendo, in parte, solo per la struttura di copertura; sono strutture semplici senza solai intermedi e con un tetto a due falde. Le fabbriche realizzate all'inizio del 1500 hanno subito diverse trasformazioni; la più importante agli inizi del 1900 con l'accorciamento, l'abbassamento e la chiusura dei fronti delle tese che vengono trasformate in officine e depositi. Nei primi anni del 2000 vengono restaurate, con interventi importanti, le coperture.

Il primo progetto di miglioramento/adeguamento sismico presentato nel 2013, sull'onda emotiva del sisma dell'Emilia del 2012, redatto sulla base di spinte modellazioni tridimensionali prevedeva interventi diffusi ed impattanti per le strutture storiche. Gli interventi proposti includevano la cucitura dei fronti mediante barre in acciaio inghisate nella muratura; il posizionamento di isolatori elastometrici in fondazione, il collegamento degli arcate ai timpani in muratura e l'irrigidimento del piano di copertura con "croci di S. Andrea". A seguito della richiesta della revisione del progetto da parte della Soprintendenza lo stesso veniva supportato da una relazione integrativa redatta da *esperti del settore* che sostanzialmente confermavano le linee generali dell'intervento minimizzando solo qualche aspetto di dettaglio.

Tale relazione non risolveva l'inadeguatezza del progetto dovuta ad una superficiale interpretazione del comportamento meccanico degli edifici; ad esempio il sistema di copertura consolidato non più di dieci anni orsono veniva nelle analisi definito "labile". Veniva quindi avviata, in accordo con il Magistrato alle Acque responsabile dell'intervento, una approfondita disamina del progetto, dei dati di input, della effettiva consistenza dell'edificio, della *prova del tempo* costituita dagli effetti dei sismi avvenuti dalla costruzione, degli obiettivi e degli interventi previsti. Si fissavano dapprima la vita nominale (100 anni) e la classe d'uso degli edifici (II° e IV°) in funzione del loro ruolo strategico; la caratterizzazione del terreno veniva stabilita dall'analisi delle prove geotecniche (classe C) e non "a favore della sicurezza" (classe D). Veniva inoltre richiesto di intraprendere un percorso che, analizzando per ogni singolo intervento proposto l'incremento della si-

curezza sismica globale, individuasse gli interventi strategici più efficaci per addivenire alla sicurezza e alla conservazione degli edifici.

Dallo studio del progetto così sviluppato, analizzando in particolare i cinematismi fuori del piano, ne derivava che potevano essere evitati gli interventi in fondazione e di ricucitura dei fronti e minimizzate le opere in copertura. Gli interventi così ottimizzati hanno permesso di addivenire non solo al miglioramento ma al completo adeguamento dell'edificio.

LA VULNERABILITÀ DEGLI EDIFICI COMPLESSI ED IN AGGREGATO

La configurazione urbanistica del centro storico della città di Venezia comporta che, sotto il profilo strutturale, gran parte degli edifici non possa definirsi isolato in quanto i fronti edilizi non presentano soluzioni di continuità o evidenti giunti strutturali che separino le fabbriche. Complesso risulta determinare il rapporto tra le varie unità strutturali (si ammorsano?, si affiancano? ...) richiedendo indagini archivistiche da verificare con accurate ispezioni in sito. Molto spesso a Venezia, ma anche in molti altri centri storici, capita dunque di dover determinare la vulnerabilità di edifici adiacenti ad altri ma dei quali risultano ignote le interrelazioni. Per individuare un metodo per affrontare tali problematiche si ritiene utile riprendere l'esperienza fatta per la determinazione della vulnerabilità sismica al Teatro Comunale di Ferrara.

L'edificio è uno dei più importanti esempi di teatro all'italiana e la sua configurazione architettonica è complessa e non può essere codificata, sotto il profilo sismico, in nessuna delle tre tipologie, chiesa, palazzo e torre, finora analizzate dalla normativa sismica sui beni culturali. Per i suoi valori storico artistici e architettonici il complesso è tutelato ai sensi del "Codice dei Beni Culturali" (D. Lgs. 42/2004). Con le ricerche d'archivio sono state identificate due fasi costruttive (la prima relativa a sala e palcoscenico, la seconda riguardante ridotto, camerini, rotonda etc) e i principali interventi di consolidamento strutturale avvenuti nel tempo; il più importante è quello del 1985, molto ben documentato, che ha fornito utili informazioni anche sui dettagli costruttivi. Il rilievo è stato completato con la restituzione del quadro fessurativo e deformativo che dà importanti indicazioni sulle risposte dell'edificio alle sollecitazioni sismiche, considerato anche il recente evento del maggio 2012. Con la campagna di indagini eseguita si sono acquisite informazioni sulle fondazioni, sufficientemente profonde ed omogenee, sulle murature, che presentano discrete caratteristiche meccaniche, e si è verificata la corrispondenza tra il rilievo diretto e la documentazione d'archivio. Per la caratterizzazione dei terreni si è fatto riferimento alle prove realizzate nella vicina Piazza della Repubblica. Con gli studi compiuti si è

arrivati ad un discreto livello di conoscenza (LC2) che corrisponde ad un fattore di confidenza $F_c = 1,15$.

Il Teatro è una struttura complessa, non regolare né in pianta né in elevato. Si trattava di identificare il modello di calcolo che meglio si adattava a rappresentare il comportamento reale dell'edificio quando è investito da un'azione sismica. La sua schematizzazione con un modello meccanico complessivo, di tipo scatolare, risultava non efficace in quanto la discontinuità dei solai e il modesto collegamento tra le pareti non garantiva un realistico comportamento d'assieme.

Come primo procedimento di calcolo si è pertanto deciso di ipotizzare il funzionamento sismico per macro elementi individuando le parti architettoniche con un comportamento in parte autonomo rispetto al resto della costruzione. Sulla base della conformazione architettonica e delle informazioni sulle fasi costruttive, si è suddivisa la fabbrica in cinque unità strutturali. È da tener presente che l'impianto del teatro non presenta giunti strutturali e che quindi le semplificazioni introdotte possono essere penalizzanti per le capacità resistenti. È altresì da rilevare che mentre le unità strutturali identificate presentano regolarità e simmetrie, il complesso nel suo insieme è irregolare in pianta ed in elevato; questo aspetto non favorisce la risposta della struttura al verificarsi dell'azione sismica poiché comporta delle eccentricità importanti tra il centro delle rigidezze e quello delle masse.

Per una corretta valutazione del comportamento dei singoli corpi e delle loro interrelazioni è risultato fondamentale il rilievo e l'interpretazione dei quadri fessurativi pregressi e conseguenti al sisma del 2012. La testimonianza di quanto accaduto è risultata fondamentale in quanto è una sorta di "collaudo della storia" che riveste una fondamentale importanza rispetto alla valutazione della sicurezza nei riguardi dello SLV.

Si è proceduto per livelli successivi di valutazione della sicurezza sismica. Con il primo livello LV1 si è effettuata una analisi di tipo qualitativo ed una prima valutazione con un modello meccanico semplificato. Il Ridotto, la Casa Borsari e i Camerini sono stati studiati secondo le procedure previste per la tipologia a palazzo; più complesso si è rilevata l'analisi dei corpi della Sala e della Rotonda caratterizzati da volumi a tutt'altezza senza orizzontamenti. Per essi si è messo a punto una specifica metodologia impostata sul modello di verifica delle chiese integrato con le caratteristiche costruttive dei palazzi. A livello qualitativo sono state confermate le carenze strutturali che le indagini e i rilievi avevano già segnalate: la scarsa resistenza delle murature del corpo del Ridotto in direzione trasversale a Corso Martiri evidenziata con le lesioni nei locali ai piani terra e nei pilastri del portico è avvalorata dalle valutazioni numeriche; la vulnerabilità della parete di fondo del palcoscenico, snella, senza vincoli di orizzontamenti e già profondamente lesionata è stata confermata dallo studio meccanico.

Per la verifica di secondo livello LV2 si è proceduto a delle verifiche locali con un'analisi delle porzioni più vulnerabili della struttura; sono stati analizzati in questa sede i meccanismi elementari di collasso fuori piano più prevedibili e evidenziati dai quadri fessurativi esistenti, controllando in corrispondenza ad essi l'equilibrio alla rotazione di porzioni murarie rigide attorno a cerniere cilindriche.

Per il Ridotto, i Camerini e la Casa Borsari si è proceduto ad una verifica di terzo livello LV3 attraverso l'analisi statica non lineare sviluppata secondo quanto previsto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni adottando un modello a telaio equivalente. Tale schematizzazione è risultata di non facile applicazione essendo gli edifici studiati contraddistinti da una serie di peculiarità costruttive che malamente si prestano ad essere tradotte nel modello.

In linea generale si segnala che il comportamento dei vari corpi analizzati, in termini di spostamento, migliora se si inseriscono dei vincoli fissi che simulano l'interrelazione con gli altri corpi di fabbrica. Questo conferma quanto sia importante garantire il comportamento globale ed unitario dell'intero complesso.

L'edificio è realizzato con buoni materiali e tecniche costruttive e non ha subito sostanziali modifiche conservando un comportamento strutturale omogeneo e d'assieme. Presenta una diffusa vulnerabilità al ribaltamento delle murature perimetrali su Corso della Giovecca e Corso Martiri. Le parti sommitali libere e scarsamente vincolate, sono particolarmente sollecitate e presentano i maggiori spostamenti che devono essere confinati. Dalle verifiche effettuate e dall'analisi del comportamento del teatro nel tempo si è riscontrato che la mutua interrelazione fra le unità strutturali garantisce una migliore risposta alle sollecitazioni sismiche. La vulnerabilità dell'organismo edilizio risulta quindi fortemente condizionata dai meccanismi di danno di primo modo fuori dal piano e il loro controllo rappresenta il primo obiettivo di qualsiasi intervento di prevenzione; in sede di verifica, si è ritenuto opportuno porre maggiore attenzione a questi fenomeni rispetto al controllo degli stati di sforzo e deformazione dei materiali.

L'AUMENTO DELLA VULNERABILITÀ DOVUTO AD INTERVENTI INCONGRUI

Altro aspetto importante e che interessa direttamente gli organi di tutela sono gli aumenti delle vulnerabilità dovuti a successive modificazioni della fabbrica originaria. Da una analisi degli effetti degli eventi sismici risulta che, nella maggior parte dei casi, i maggiori danni si riscontrano negli immobili dove nel tempo sono intervenute sostanziali modificazioni o sono

stati impiegati materiali incongrui. Le configurazioni iniziali delle fabbriche antiche sono solitamente simmetriche, bilanciate e adeguatamente dimensionate dalla maestria dei costruttori. Pericolosi sono di solito interventi successivi che, anche se interessano porzioni limitate dell'edificio, alterano il comportamento complessivo strutturale.

Esempio eclatante è il Duomo di San Felice sul Panaro che a causa degli ultimi eventi sismici ha subito gravissimi danni. La costruzione iniziata nel 1500 con una chiesa a capanna ha subito nel tempo pesanti modificazioni: l'apertura di diverse cappelle laterali che hanno interrotto la continuità delle murature, l'inglobamento della torre campanaria per la realizzazione della nuova abside, la sopraelevazione per la costruzione di una volta reale e il rivestimento della facciata. Sono queste trasformazioni la causa dell'attivazione di ben 23 meccanismi di danno che hanno determinato il crollo quasi totale della chiesa.

SEMPLICI ED ECONOMICI SISTEMI DI MESSA IN SICUREZZA

Per la riduzione della vulnerabilità sismica importanti interventi, se programmati, possono essere effettuati in occasione di lavori di manutenzione riducendo oneri economici e impatti sugli edifici. Nel frattempo risultano particolarmente efficaci ed attuabili, visti i costi contenuti e la veloce esecuzione, interventi di provvisoria messa in sicurezza affiancando alle strutture esistenti della fabbrica storica elementi integrativi in acciaio opportunamente tesati che contribuiscono alla resistenza della muratura.

Nel campanile di S. Stefano a Venezia, che presenta uno strapiombo di circa m 2, quattro ordini di catene in trefoli di acciaio, a contrasto dell'apertura di storiche lesioni longitudinali, hanno stabilizzato negli ultimi anni la perdita di verticalità. Sono state installate con l'ausilio degli alpinisti, in pochi giorni e con un costo di euro 25.000.⁽⁵⁾

Un muro isolato del convento dell'isola di San Francesco del Deserto, puntellato da anni per la sua pericolosa inclinazione, è stato consolidato con cavi verticali. I contrafforti virtuali, che riprendono il ritmo di quelli in muratura, sono costituiti da trefoli e piastre in acciaio, assemblati a secco, totalmente reversibili; l'incremento delle tensioni di compressione conseguenti alla tesatura dei cavi, opportunamente calibrata tra le zone in sopra e sotto pendenza, conferisce al muro una maggiore resistenza alle azioni orizzontali.

⁽⁵⁾ A. Lionello, I. Cavaggioni, P.P. Rossi, C. Rossi, *A quick and low-cost method for strengthening high buildings: the case of St. Stefano's bell-tower in Venice*. Atti International Seminar "Structural analysis of storical constructions", Padova 2004, pp.781-786.

CONCLUSIONI

Per la mitigazione del rischio sismico si ritiene che il percorso del miglioramento debba essere sviluppato approfondendo lo studio delle caratteristiche e dei comportamenti della muratura per addivenire a delle valutazioni certe che determinino in modo quantitativo, oltre che qualitativo, la vulnerabilità degli edifici storici.

I modelli matematici, molto spesso, non rappresentano il reale comportamento di un edificio in muratura; sono basati su fondamenti teorici diversi; a volte i risultati delle verifiche di 1°, 2° e 3° livello non convergono e non individuano univocamente i meccanismi di collasso sollevando forti dubbi sulla loro rappresentatività. È opportuno quindi che la verifica sia realizzata a tutti i livelli, preferibilmente con modelli di calcolo diversificati, confrontando tra loro i risultati. Ma è il quadro fessurativo che rappresenta la risposta reale dell'edificio alle sollecitazioni e che ci permette di individuare chiaramente a livello qualitativo il comportamento strutturale della fabbrica. Sono le lesioni e le deformazioni che ci forniscono le più corrette informazioni sui meccanismi di danno. Il quadro fessurativo ha un ruolo fondamentale nella distribuzione delle tensioni e non può essere trascurato nella verifica strutturale. È del tutto insufficiente inserire coefficienti riduttivi che rappresentino genericamente le fessurazioni; trascurare la presenza di una lesione nello studio della modellazione può portare, nella valutazione delle resistenze, ad errori di un ordine di grandezza. Ogni verifica matematica dovrà quindi essere confrontata con il quadro fessurativo e solo qualora sia congruente con quest'ultimo potrà essere sviluppata per favorire più precisi risultati a livello quantitativo. Infine per la determinazione delle caratteristiche meccaniche della muratura è opportuno introdurre ulteriori parametri rappresentanti la geometria degli elementi, le sostituzioni murarie e le fessurazioni diffuse.