3. LINEE GUIDA DI RESTAURO E IL CONSOLIDAMENTO

Murature in elevato

1.1. Ogni intervento eseguito sulle murature, pur tenendo conto delle necessità imposte dalla normativa vigente, deve agevolare la conservazione del carattere e della finitura dell'apparecchio murario. L'intervento di consolidamento non deve tradursi nell'introduzione di strutture che possano comportarsi come corpi estranei nella muratura. Tutte le operazioni di consolidamento statico devono porre particolare attenzione alla conservazione del materiale autentico. È da evitare l'utilizzo di materiali (come malte cementizie, litotipi estranei al contesto locale) non compatibili fisicamente, chimicamente e meccanicamente con quelli originari.

Ogni intervento sulle murature in elevazione non deve comunque alterare, nei caratteri geometrici e di connessione, la muratura in elevazione, se non in base di una corretta e completa valutazione di carattere statico. Ogni intervento deve quindi valutare in via preliminare sia lo stato tensionale della muratura (in termini di flusso e localizzazione delle tensioni), che le sue caratteristiche di resistenza e rigidità attese.

Gli interventi possono essere classificati di conseguenza in cinque tipologie, tra di loro correlate:

1. interventi che non modificano lo stato tensionale (mantenendo il flusso delle tensioni e conservando le condizioni di localizzazione delle stesse);
2. interventi che modificano lo stato tensionale (cambiando il flusso delle tensioni e/o provocando nuove e differenti condizioni di localizzazione delle stesse);
3. interventi che diminuiscono la resistenza e/o la rigidità della muratura;
4. interventi che conservano la resistenza e/o la rigidità della muratura;
5. interventi che aumentano la resistenza e/o la rigidità della muratura.

Le tipologie sopra riportate devono essere valutate con attenzione, e ciascun intervento sull'edificio deve essere classificato di conseguenza a cura del progettista.

Sono sempre ammissibili gli interventi che non modificano lo stato tensionale (1) o che conservano la resistenza e/o la rigidità della muratura (4), a meno che non sussistano altre ragioni all'intervento.

Interventi che modificano lo stato tensionale (2) non sono necessariamente da considerare come negativi, anzi si possono avere situazioni in cui la modifica dello stato tensionale, a parità delle altre condizioni, può essere assunta come situazione migliorativa della sicurezza strutturale. La modifica dello stato tensionale può manifestarsi sia in caso di rimozione di elementi incongrui, che nel caso d'introduzione di nuovi elementi o di chiusura di vani.

Devono essere generalmente evitati interventi che diminuiscono la resistenza e/o la rigidità della muratura (3), i quali inducono una riduzione della sicurezza strutturale, a meno che non si possa dimostrare che a seguito di tali interventi la sicurezza complessiva dell'organismo sia tale da rispettare comunque i minimi previsti da normativa.

Sono da incoraggiare interventi che aumentano la resistenza e/o la rigidità della muratura (1.1.5.), che inducono un incremento della sicurezza sismica. Resta però l'obbligo di verificare che tale incremento sia effettivamente positivo, soprattutto nel caso di edifici in continuità con altri, e che non provochi una differente, e non prevista, risposta strutturale d'insieme.

In generale gli interventi che modificano la resistenza e/o la rigidità di un paramento murario in elevazione, si rendono necessari al fine di eliminare gli effetti del suo danneggiamento, generato dall'intervento antropico ovvero dall'evento sismico.

Le tipologie d'intervento sono richiamate di seguito.

L'intervento di *scuci-cuci*, finalizzato al ripristino della continuità muraria attraverso operazioni che prevedono l'asportazione della muratura nel tratto lesionato, con una larghezza e una profondità che dipendono dall'ampiezza della lesione, e la sua sostituzione con materiale identico e della stessa pezzatura, posto in opera a "cantieri alternati". Nei casi di lesioni passanti, è necessario intervenire sull'intero spessore del muro, prima da un lato e poi dall'altro per motivi di sicurezza, avendo cura di connettere i due paramenti.

L'intervento di scuci-cuci deve rispettare l'andamento dei filari ed utilizzare materiale con caratteristiche fisico-chimiche e meccaniche analoghe al preesistente.

Il risanamento della lesione è finalizzato alla ripresa dei meccanismi resistenti della parete: a questo scopo è necessario ammorsare la risarcitura con la muratura preesistente e usare malte di buona qualità compatibili con quelle originali.

È sconsigliato l'uso di barre metalliche inserite nella massa muraria e disposte ad attraversare la lesione, perché il problema viene solo trasferito ai bordi di aggancio con il muro esistente.

Poiché dal punto di vista meccanico l'intervento di cucì e scuci è molto invasivo e costoso, si raccomanda di ricorrere prioritariamente ad altre tecniche d'intervento per risolvere il problema della sconnessione, del danneggiamento e dell'allentamento di un pannello murario.

Le iniezioni di malta si rendono necessarie nelle murature incoerenti o caratterizzate da vuoti diffusi e numerosi, per carenze costruttive o per fenomeni di disgregazione insorti nel tempo.

L'intervento deve essere preceduto da indagini tese a verificare la presenza nel muro di legante a base di gesso, molto diffusi in Abruzzo e nell'Area Omogenea 5.

È preferibile che la malta da iniettare sia a base di calce naturale debolmente idraulica o grassello di calce misto a pozzolana; è sconsigliabile l'uso di malte che utilizzino leganti eminentemente idraulici o cementizi.

Dal punto di vista meccanico la tecnica dell'iniezione di malte rappresenta un consolidamento per rigenerazione della muratura dissestata. Pur essendo una tecnica che genera modificazioni irreversibili, è assai meno traumatica e invasiva della soluzione dello scuci-cuci, che comporta demolizioni e ricostruzioni parziali della muratura.

L'uso di tecniche innovative deve essere preso in considerazione solo in presenza di un adeguato know-how da parte del progettista e, soprattutto, dell'impresa che effettuerà l'intervento. Ciascuna tipologia dovrà essere correttamente inquadrata in un contesto di verifica strutturale di tipo analitico, e in riscontro con le prescrizioni di normativa.

Alcune tecnologie d'avanguardia si sono sviluppate in tempi più recenti, trovando nel restauro un'applicazione di estremo interesse. Tra le tecniche innovative più significative si richiamano:

- Utilizzo di resine, tra cui quelle più comunemente usate le resine epossidiche.
- Utilizzo di materiali compositi, costituiti in genere da una matrice di resine polimeriche (epossidiche, poliestere, viniliche) o di malte inorganiche (pozzolaniche) fibrorinforzate, in cui sono immerse fibre sintetiche (vetro, aramide, carbonio), che conferiscono la resistenza al composito. Come per le altre tecnologie innovative si deve tuttavia fare attenzione a possibili effetti collaterali negativi come, ad esempio, la sensibilità ai raggi ultravioletti.
- Utilizzo di acciai speciali: questi hanno fatto grandi progressi, conseguendo non solo eccezionali resistenze, ma anche buona durabilità e compatibilità con le costruzioni storiche, come ad esempio gli acciai inossidabili e al titanio. Interessanti sono anche i così detti acciai "a memoria di forma" (*shape memory alloy*).
- Utilizzo di apparecchi viscosi oleodinamici (*shock transmitter*): questi apparecchi consentono di accoppiare due elementi strutturali (ad esempio un solaio ed una parete) in modo da consentire le deformazioni relative lente, come le deformazioni termiche o quelle indotte da cedimenti del suolo, mentre si comportano rigidamente, costituendo quindi veri e propri vincoli, per effetto delle azioni dinamiche, come il sisma.

Interventi che modificano la resistenza e/o la rigidezza di un paramento murario in elevazione, generalmente non ricompresi tra gli interventi a valenza strutturale.

Trattamenti delle superfici murarie

Qualsiasi intervento sull'architettura dei fronti esterni non deve apportare cambiamenti e alterazioni tali da compromettere il valore storico, tipologico o documentario dell'edificio.

Le integrazioni vanno compiute preferenzialmente con materiali e tecniche simili o affini a quelle già presenti nell'edificio. In edifici che abbiano conservato in tutto o in parte significativa l'impianto pre-moderno, è consigliabile l'impiego dei materiali tradizionali o comunque con essi compatibili in sostituzione di quelli posti in opera senza riguardo alla storicità dell'edificio (come blocchetti di calcestruzzo, intonaci cementizi). Anche tali sostituzioni devono comunque essere attentamente valutate in vista della variazione dello stato tensionale e della rigidezza del paramento murario.

È consigliata la rimozione di malta bastarda e di intonaci cementizi e comunque non appartenenti alla cultura edilizia locale, anche perché possono dare luogo a fenomeni di rigonfiamento e distacco. La rimozione dovrà essere effettuata con mezzi opportuni per non indurre danneggiamenti alla muratura esistente. È sconsigliato l'impiego di acqua in grande quantità, per evitare infiltrazioni all'interno della muratura, dannose soprattutto in caso di malte di gesso. È sconsigliato l'utilizzo di tecniche invasive, come le idropultrici (sia a sabbia che ad acqua), data la notevole alterazione che possono indurre nella consistenza delle malte e dei mattoni, soprattutto in presenza di laterizi scadenti, di scarsa cottura o di notevole compromissione a seguito di agenti atmosferici.

La risarcitura dei giunti della superficie muraria a vista si rende necessaria laddove si riscontra una carenza di malta tra i ricorsi di pietra o di mattoni, con l'obiettivo di ricreare il contatto tra i componenti della muratura (pietre e/o mattoni). La risarcitura va eseguita con malta a base di grassello di calce idraulica e sabbia di fiume, sempre dopo averne verificato la compatibilità con il legante tradizionale.

Finitura a "raso pietra" o a "raso sasso". Va conservata e reintegrata negli interventi che si rendano necessari la finitura a "raso pietra" o a "raso sasso", molto frequente nell'intero territorio abruzzese, e in particolare nell'area omogenea 5. Questa finitura è ottenuta spianando la malta refluenta dai giunti sulla faccia vista del materiale, che risulta così livellato e regolarizzato dalla stessa malta.

Intonaci

Vanno conservate tutte le stesure di intonaco effettuate con materiali e metodi pre-moderne. Nei casi di reintegrazione o integrale rifacimento di murature, è necessario utilizzare esclusivamente malte realizzate con materiali, granulometrie e tecniche di posa in opera riconducibili alla tradizione. I materiali utilizzati devono presentare sufficiente traspirabilità, così da garantire

l'evaporazione dell'umidità presente nei muri o negli ambienti interni; la malta deve essere costituita da leganti tradizionali quali, grassello di calce aerea, sabbia a grana media e fine a seconda dello strato di intonaco da stendere, pozzolana (in casi specifici cocchiopesto, polvere di marmo ed altri inerti comunque naturali). Va evitato l'impiego di malta cementizia o di miscele a prevalente contenuto di cemento e l'adozione di intonaci plastici di qualsiasi genere.

È preferibile che la realizzazione dell'intonaco segua tecniche analoghe a quelle originarie, con la stesura, in tre strati successivi (rinzafo, arriccio, tonachino) a cazzuola e frattazzo senza l'ausilio di guide, ma seguendo l'andamento delle murature del costruito storico. È da rigettare la pratica di asportazione di superfici intonacate, anche parziali, per evidenziare o porre a faccia a vista apparecchi murari o elementi aventi valore prettamente strutturale, come archi di scarico, piattabande, travi in legno, non concepiti in origine come elementi a vista.

In mancanza di riferimenti attendibili sul colore originario, la scelta del colore dovrà tener conto del valore cromatico che il fabbricato presenta nel contesto ambientale ed urbanistico in cui è inserito. È necessaria la diversificazione cromatica tra i partiti architettonici e decorativi aggettanti, realizzati in intonaco o in stucco sagomato (come cornicioni, fasce marcapiano, stipiti, architravi), e il fondo della parete, sempre nel rispetto delle cromie esistenti e dei materiali della tradizione. In linea generale, mentre i partiti architettonici e decorativi vanno tinteggiati con colori imitanti il tono della pietra, i fondi sono assimilabili a paramenti laterizi, rinviando comunque le scelte progettuali alla interpretazione dello specifico contesto in cui si opera.

Va considerato comunque che dal punto di vista strutturale gli intonaci spesso possono avere un effetto negativo in quanto, ricoprendo la tessitura originale della muratura, non permettono di apprezzare l'effettivo stato di connessione e di qualità. In presenza di lesioni superficiali dell'intonaco, risulta sempre consigliabile eseguire saggi per valutare se tali lesioni sono di carattere superficiale oppure rivelatrici di situazioni di danneggiamento e sconnesione latenti, dovute allo stato tensionale della muratura o alla presenza di legature ed organizzazioni strutturali non adeguate ed incongrue.

Cornicioni

Vanno conservati i cornicioni realizzati secondo le regole classiche o nel più semplice schema "a romanelle", quando costituiscano elementi costruttivi riconducibili a tecniche e/o tecnologie tradizionali. Nel caso in cui non risulti fattibile, si deve procedere alla ricostruzione parziale o totale, utilizzando sia materiali simili agli originali per dimensione, forma, composizione e colore, sia tecnologie costruttive tradizionali. Poiché si tratta di strutture aggettanti, quindi sensibili all'azione dei sismi, l'intervento dovrà essere realizzato un adeguato ancoraggio alla muratura

d'ambito. Nel caso di edifici con porzioni o interi cornicioni non compatibili - ad esempio in cemento, collegati o no a cordonature di irrigidimento - si deve prevedere la loro eliminazione.

Le caratteristiche strutturali e architettoniche dei cornicioni non devono essere alterate, ed è esclusa la messa in opera di elementi costruttivi in contrasto con la tradizione: va posta quindi particolare attenzione alla conservazione e alla reintegrazione degli sporti di gronda realizzati con mensole e travi parallele al muro, tipiche della tradizione locale.

L'eventuale eliminazione di cornicioni esistenti, a seguito di valutazioni di non congruità formale, va valutata attentamente sia in quanto portatrice di effetti di redistribuzione delle masse, (redistribuzione che in generale risulta essere positiva qualora la massa eliminata sia una massa posta in sommità all'edificio), sia in quanto causa di disturbo nella fase di demolizione. Per tale motivo, vanno assolutamente evitate situazioni di strappo, e contenute le azioni legate all'utilizzo di mezzi meccanici (martelli, martelloni pneumatici o simili).

Inserimento di tiranti

Alla fine di garantire un comportamento globale ottimale dell'edificio, è necessario che gli interventi siano mirati ad assicurare un soddisfacente comportamento d'assieme, mediante la realizzazione di un efficace ammorsamento tra le pareti e collegamento dei solai alle pareti; inoltre, deve essere verificato che le eventuali spinte prodotte da strutture voltate siano efficacemente contrastate correggendo il malfunzionamento dei tetti spingenti. La realizzazione di questi interventi è un prerequisito essenziale per l'applicazione di gran parte dei metodi di analisi sismica globale dell'edificio, che si basano sul comportamento delle pareti murarie nel proprio piano, presupponendone la stabilità nei riguardi di azioni sismiche fuori dal piano.

L'inserimento di tiranti metallici (in acciaio) è uno dei sistemi più efficaci per esercitare un'azione di contrasto al ribaltamento.

Nel caso di edifici in muratura con più piani, le catene vanno in genere collocate in corrispondenza dei solai (orizzontamenti di piano) e posizionate al di sotto del pavimento. In presenza di solai che non garantiscano adeguato contrasto all'azione di compressione (per faticenza, o per carenza dimensionale), le catene vanno obbligatoriamente posizionate in adiacenza ai muri trasversali, generalmente al livello dei solai, sia perché sono in grado di contrastarne in maniera efficace il tiro, sia perché in questo modo si consegue un efficiente collegamento puntuale tra pareti ortogonali. La disposizione più efficace è costituita da una coppia di catene gemelle (catene binate) poste in parallelo, lateralmente allo stesso muro.

Per ciò che concerne i capo-chiave, compatibilmente con le valutazioni di carattere architettonico, è preferibile l'adozione di quelli derivanti dalla tecnica tradizionale a paletto singolo, per la

semplicità costruttiva e per il basso impatto visivo che producono. È accettabile comunque l'impiego di tecnologie contemporanee (come il ricorso a capo-chiave a piastra). Sono invece sconsigliate forme articolate del paletto (come barre incrociate o a serpentina), anche perché meno adeguate alla funzione statica richiesta. Il dimensionamento dei capi-chiave deve infatti tener conto delle caratteristiche dell'elemento murario (colonna, pilastro) collegato. Spesso risulta necessario un consolidamento locale della muratura, nella zona di ancoraggio. I capi-chiave vanno generalmente lasciati a vista; soltanto in alcuni casi (edifici di interesse storico-monumentale) possono essere nascosti, alloggiandoli in tasche di intaglio all'uopo realizzate nella muratura, e successivamente mascherandoli con sovrapposizione di protesi in elementi lapidei, opere a stucco e da semplici inserti di intonaco. Dove è possibile, è sempre consigliabile l'impiego di capi-chiave esterni, appositamente progettati non solo per la funzione strutturale ma anche per quella estetica.

Ogni catena deve essere dimensionata, oltre che in funzione della resistenza a trazione del materiale metallico di cui è costituita, anche con una sezione trasversale rapportata alla lunghezza, al fine di assicurarne un'adeguata rigidità. Deve inoltre essere sottoposta ad uno stato di pretensione commisurato alla entità del tiro in esercizio, valutando l'entità delle cadute di tensione nel tempo, e le azioni locali (all'interfaccia capo-chiave - muratura di attestamento), le quali devono risultare compatibili con le capacità resistenti locali delle parti murarie che forniscono il contrasto.

Tiranti disposti nelle due direzioni principali del fabbricato, a livello dei solai e in corrispondenza delle pareti portanti, ancorati alle murature mediante capo-chiave, forniscono un efficace vincolo contro il ribaltamento fuori piano dei pannelli murari e conferiscono un elevato grado di connessione tra le murature ortogonali, tale da favorire il comportamento d'insieme del fabbricato. Nel realizzare gli incatenamenti trasversali, si possono sfruttare le travi dei solai esistenti come tiranti, collegandole con opportuna ferramenta a capi-chiave esterni.

È da valutare con attenzione il ricorso agli ancoraggi per aderenza (mediante iniezioni di resine o malte a base cementizia nella muratura), sia per le possibili incompatibilità tra i materiali che per la difficoltà di controllare l'efficacia dell'ancoraggio.

Nel caso che la verifica locale della muratura e la distribuzione delle catene permetta l'utilizzo di capi-chiave a paletto, questi non devono mai essere posti in opera in posizione verticale o orizzontale. Il loro orientamento deve essere scelto in funzione delle reazioni che possono fornire le strutture poste a immediato contatto. Si ribadisce infatti che l'efficacia dei tiranti dipende da vari fattori, ma soprattutto dalla capacità di ripartire gli sforzi nella muratura di contrasto, pertanto è

necessario eseguire prima degli interventi localizzati di consolidamento mirati a rinforzare la porzione di muratura interessata dalla diffusione delle forze.

Aperture

Porte e finestre

Nelle operazioni di ricostruzione dovranno essere rispettate numero, posizione, forme e materiali delle aperture esistenti. Nel caso di aperture lapidee sconnesse dal sisma, è necessario prevedere la ricomposizione dei conci e la reintegrazione di quelli mancanti in continuità di materiali e forme. La variazione delle aperture esistenti è ammessa solo nel caso di restituzione di assetti esistenti nel rispetto delle tipologie indicate, o nel caso di eliminazione di aggiunte incongrue.

In generale, ogni intervento di aggiunta/modifica delle finestre deve essere preceduto da verifiche e attestazioni di reali necessità funzionali e igieniche e, in ogni caso, compatibile e coerente con la composizione architettonica della facciata. Sia nei casi di modifica che di ricostruzione, l'impaginamento dei prospetti dovrà rispettare il rapporto tra pieni e vuoti utilizzato nella tradizione costruttiva locale. I materiali devono essere compatibili con il costruito storico e con i modelli di riferimento.

La modifica dei prospetti di un organismo strutturale deve essere comunque privilegiata nel caso in cui costituisca fase propedeutica alla ricostituzione di una corretta continuità verticale delle aperture, e quindi possa condurre ad un più efficace allineamento verticale degli assi dei maschi murari.

Si deve considerare che l'intervento di apertura altera per sua natura sia lo stato tensionale che la resistenza e rigidità del paramento murario, e deve quindi essere sottoposto ad attenta valutazione dal punto di vista meccanico.

Balconi

Tutti i balconi caratterizzati da elementi architettonici o decorativi attribuibili a modelli e tecniche della tradizione dovranno essere conservati o rimontati, qualora siano ancora disponibili dopo l'azione del sisma. Qualora siano presenti elementi non compatibili sotto il profilo tipologico o architettonico (come i balconi con struttura in c.a., con sporgenza accentuata) si deve prevedere la loro sostituzione. Non sono ammesse variazioni di posizione o di dimensione, a meno dei casi citati, né la realizzazione di nuovi balconi.

Solo in casi documentati e previo studio dell'originale, è consentita la ricostruzione, mantenendo i caratteri morfologici originari e utilizzando materiali e tecnologie costruttive analoghe o almeno appartenenti alla tradizione locale.

Nel caso di intervento su strutture in aggetto come i balconi, sia in sostituzione che in rimozione, si deve considerare anche il contributo in termini di azione verticale che tali elementi producono a seguito di azione sismica.

Orizzontamenti: le strutture voltate

Gli interventi realizzati sulle strutture voltate devono agevolare il rispetto degli elementi strutturali, la conservazione dei materiali, la congruenza con l'assetto tipologico dell'edificio. La scelta della metodologia di consolidamento deve avvenire in relazione alle cause di dissesto, definite e documentate preventivamente; inoltre, tale scelta deve coniugare l'esigenza di sicurezza strutturale al mantenimento della configurazione spaziale della struttura voltata.

Sono ammesse opere di ricostruzione della continuità strutturale, con materiali e tecniche tradizionali, solo se i dissesti pregressi o l'eccessivo degrado dei materiali componenti rendono effettivamente la struttura non più idonea ad adempiere il proprio ruolo.

La maggior parte delle volte rilevate nei centri storici in esame sono di mattoni in foglio impiegate con scopo decorativo, in quanto provvedono solo a sostenere se stesse e a qualificare architettonicamente l'ambiente coperto; al sostegno del piano di calpestio superiore provvede un solaio ligneo nascosto alla vista. In questo caso si ritengono sufficienti opere mirate al restauro della struttura con materiali della tradizione locale. In altri casi le volte in foglio possono presentare il rinfiacco all'estradosso che contribuisce a migliorare le condizioni di stabilità globale a scapito di un incremento della spinta; pertanto gli interventi di consolidamento che ne prevedono la rimozione sono da valutare caso per caso.

Per quanto riguarda le volte a una e più teste, sono ritenute particolarmente idonee le tecniche di consolidamento premoderne (come inserimento di tiranti o ricucitura delle lesioni), opportunamente aggiornate, in quanto permettono di conseguire livelli di sicurezza accettabili, nei confronti delle azioni sismiche, e non comportano lo stravolgimento dell'originaria configurazione statica. Sono anche ammessi interventi di consolidamento all'estradosso mediante FRP, opportunamente poste in opera, o irrigidimenti con tirantature in diagonale. Da evitare l'impiego di cappe armate con rete elettrosaldate.

Le volte apparecchiate in conci di pietra vanno conservate ed eventualmente reintegrate, per la loro importanza dal punto di vista tecnico e documentario. Per le volte in concrezione e simili

(come in scapoli di pietra) valgono gli stessi principi enunciati nel caso di volte di mattoni a una e più teste.

La trattazione delle volte sotto il profilo statico-strutturale è analoga ai sistemi ad arco. In questo caso si prevedono due schemi strutturali di riferimento:

1.3.1. schema ad arco, per archi insistenti su imposte fisse;

1.3.2. schema arco-piedritto, detto "a portale", per archi insistenti su piedritti.

Si deve tener conto del fatto che un arco o un portale collassano generalmente per la formazione di almeno quattro cerniere, ovvero quando si formano tre cerniere (proprie) e un doppio pendolo (cerniera impropria), che induce lo slittamento a taglio di una parte dell'arco rispetto all'altra.

Nello schema ad arco, per contrastare la formazione delle quattro cerniere, di cui due all'estradosso e due all'intradosso, si può intervenire sia incrementando la resistenza laterale delle imposte, che incollando tessuti o lamine di FRP all'estradosso ovvero all'intradosso. In questo secondo caso, l'intervento di rinforzo si esegue preferenzialmente applicando tessuti o lamine di FRP all'estradosso, allo scopo di inibire la formazione di cerniere all'intradosso; in alternativa si possono applicare tessuti o lamine di FRP all'intradosso dell'arco (se non è faccia a vista) per inibire la formazione di cerniere al suo estradosso, con una soluzione che peraltro è meno efficace. Un'altra pratica possibile, meno frequente, consiste nell'applicare il rinforzo sia all'estradosso che all'intradosso dell'arco, per prevenire la formazione di cerniere del primo e del secondo tipo.

Tra gli schemi strutturali finalizzati alla determinazione delle caratteristiche della sollecitazione sulla struttura rinforzata, devono essere sempre inclusi quelli che prevedono la formazione di cerniere alle imposte, a meno di non realizzare specifici interventi che ne impediscano la formazione. Gli interventi di rinforzo parziali, eseguiti su parte dell'estradosso o dell'intradosso, non escludono la formazione di cerniere responsabili dell'attivazione di un cinematismo; tuttavia, se opportunamente concepiti e realizzati, contribuiscono a incrementare il valore del carico di collasso.

In tutti i casi in cui si prevede un intervento di tipo innovativo è consigliabile preferire alle lamine di FRP i tessuti, che meglio si adattano alla geometria del supporto murario e applicare, se possibile, il rinforzo sull'estradosso dell'arco; infatti in tal caso, per effetto della curvatura, si mobilitano all'interfaccia arco - FRP tensioni normali di compressione; al contrario, nel caso di un rinforzo teso applicato all'intradosso dell'arco, insorgono all'interfaccia interazioni di trazione, che riducono la resistenza alla delaminazione.

Tali tipologie di intervento si adattano anche allo schema a portale, in cui può non essere sufficiente apporre il rinforzo di FRP all'estradosso o all'intradosso dell'arco per impedire il

meccanismo ad apertura delle imposte. Occorre in tal caso intervenire sui piedritti oppure disporre una catena tra le imposte.

Nel caso delle volte, le verifiche da elaborare sono le stesse di quelle previste per lo schema ad arco. Generalmente, si consiglia di disporre lungo le generatrici una quantità di rinforzo per unità di area pari al 10% di quella disposta lungo la direttrice. La predetta percentuale deve essere innalzata fino al 25% in zona sismica. Nel caso di volte impiegate in edifici cellulari con vani di modeste dimensioni è opportuno privilegiare l'intervento di rinforzo sulla gabbia muraria la cui integrità e rigidità può consentire alla volta di equilibrare i carichi verticali con comportamenti membranali che prevedano un impegno a trazione minimo o nullo. Tale intervento, di norma, consente di evitare o ridurre quello sulla superficie curva della volta.

Nel caso più complesso di volte a doppia curvatura (cupole), si instaura uno stato tensionale con tensioni normali di trazione dirette lungo i paralleli. Esso è localizzato in prossimità dell'imposta della cupola e si estende sin oltre le reni. La modestissima resistenza a trazione della muratura giustifica il classico quadro fessurativo che frequentemente s'instaura nelle cupole: le lesioni si dispongono lungo i meridiani, con l'apice posizionato all'incirca alla metà di questi ultimi, e si estendono fino all'imposta. La fessurazione lungo i meridiani modifica lo stato di equilibrio preesistente, mobilitando valori considerevoli della spinta all'imposta, con eventuali ripercussioni sulla sottostante struttura. L'intervento mediante tessuti circonferenziali di FRP, disposti in prossimità della base della cupola, può servire a contrastare l'estensione della zona fessurata, mitigando l'incremento di spinta all'imposta.

Infine, nel caso di volte a doppia curvatura su pianta quadrata, l'intervento di rinforzo di volte a vela, ovvero volte di traslazione su pianta quadrata, spesso presenti in edifici cellulari con vani di modeste dimensioni, deve innanzitutto interessare la gabbia muraria: l'integrità e la rigidità di quest'ultima consente alla struttura voltata di equilibrare i carichi verticali con stati tensionali di sola compressione. Ove non si ritenga di poter conseguire pienamente tale risultato, i rinforzi sulla volta possono limitarsi ai "pennacchi" d'angolo, nei quali la trazione è prevista in direzione ortogonale alle diagonali del vano.

Orizzontamenti: i solai

I solai devono essere efficacemente collegati alle pareti murarie, attraverso un appoggio sufficientemente ampio ed elementi di connessione che ne impediscano lo sfilamento. Il ruolo dei solai nel comportamento sismico delle costruzioni in muratura è di trasferire le azioni orizzontali di loro competenza alle pareti disposte nella direzione parallela al sisma; inoltre essi possono

costituire un ulteriore vincolo per le pareti sollecitate da azioni ortogonali al proprio piano, oltre all'ammorsamento con le pareti ortogonali ed ai sistemi di collegamento puntuale. Per le suddette ragioni, risulta utile un irrigidimento dei solai nel loro piano, di cui vanno valutati gli effetti, a cui si associa inevitabilmente un aumento della resistenza degli elementi. Compatibilmente con il rispetto delle precedenti finalità, è opportuno che i solai con struttura in legno siano il più possibile conservati, anche in considerazione del loro ridotto peso proprio.

Un irrigidimento dei solai, nel caso dei solai lignei, può essere conseguito operando all'estradosso sul tavolato. Una soluzione è di fissare un secondo tavolato su quello esistente, disposto con andamento ortogonale o inclinato, ponendo particolare attenzione ai collegamenti con i muri laterali; in alternativa, o in aggiunta, si possono usare rinforzi con bandelle metalliche, o di materiali compositi, fissate al tavolato con andamento incrociato. Un analogo beneficio può essere conseguito attraverso un controventamento realizzato con tiranti metallici. Nel caso di solai a semplice orditura, dovrà essere curato il collegamento con le pareti parallele alle travi, realizzandolo, ad esempio, con bandelle fissate al tavolato ed ancorate nella muratura.

Nei casi in cui risulti necessario un consolidamento statico del solaio per le azioni flessionali, è possibile, con le tecniche legno-legno, limitare la deformabilità flessionale ed aumentare la resistenza con un secondo tavolato, utilizzando, ortogonalmente rispetto al tavolato esistente, dei nuovi tavoloni continui, resi collaboranti alle travi mediante perni anche di legno.

Nel caso di solai a travi in legno e pannelle di cotto, se viene dimostrata l'insufficiente resistenza nel piano, possono essere adottati interventi di irrigidimento all'estradosso con sottili caldane armate in calcestruzzo alleggerito, opportunamente collegate alle murature perimetrali ed alle travi in legno.

Nel caso di solai a struttura metallica con interposti elementi in laterizio (putrelle e voltine o tavelloni), può essere necessario collegare tra loro i profili saldando bandelle metalliche trasversali, poste all'intradosso o all'estradosso.

La scelta della tipologia di consolidamento va operata in considerazione dei seguenti fattori condizionanti: caratteristiche tipologiche degli elementi strutturali, geometria degli elementi strutturali, rilevanti carichi di esercizio, esigenza di incrementare la resistenza delle orditure lignee, necessità di diminuire la deformabilità del solaio, mantenimento di tutti gli elementi lignei, compatibilità dei materiali per il rinforzo con quelli esistenti.

Gli interventi realizzati sui solai devono consentire la conservazione dei materiali, il rispetto degli elementi strutturali, nonché la tipologia dell'orizzontamento con la salvaguardia degli elementi originari.

È ammessa la sostituzione delle strutture nei casi in cui lo stato di danno o le esigue e/o insufficienti sezioni dei componenti lignei non risultino più in grado di assolvere il proprio compito, e le notevoli deformazioni o frecce di inflessione non permettano più un recupero dell'unità strutturale. In questo caso, oltre al riutilizzo del materiale di recupero, è richiesto l'uso di legname della stessa essenza di quello originario e comunque di essenze locali. Sono invece da evitare interventi di sostituzione di solai lignei a favore di strutture in acciaio o latero-cementizie, a meno che non si proceda ad un integrale ripensamento dello schema statico dell'edificio.

In generale, è consigliabile procedere alla riparazione delle orditure principali e secondarie (laddove presenti) mediante tecnologie tradizionali che impieghino prevalentemente legno.

Il fine ultimo degli interventi di consolidamento statico deve essere il miglioramento della struttura mediante accorgimenti di rinforzo che permettano l'irrigidimento e, allo stesso tempo, il collegamento alle murature perimetrali.

Tra le varie soluzioni si consigliano quelle che ricorrono a tecnologie di consolidamento tradizionali (come la sovrapposizione di doppio tavolato ligneo o simili) rispettose dell'equilibrio statico della struttura e dei materiali di cui è costituita. A tale scopo, laddove si renda necessario, è consentito l'uso di elementi aggiuntivi (come controventature e tirantature in acciai) che in ogni caso devono risultare non invasivi.

Miglioramento delle connessioni interne su solaio a doppia orditura

Sono necessari interventi tesi a migliorare la solidarietà tra gli elementi strutturali componenti l'orizzontamento, come il miglioramento delle connessioni fra l'orditura principale e quella secondaria. L'intervento consiste nel fissare alle travi principali delle vaschette metalliche a doppio vano nelle quali vengono incassate le travi secondarie; in corrispondenza della trave principale la tavola in legno viene fissata ai travetti con chiodi e irrigidita saltuariamente con piastrine metalliche trasversali per evitarne la fessurazione longitudinale. Questo sistema solidarizza la struttura lignea, impedisce lo scorrimento dei travicelli sopra la trave e di conseguenza limita le deformazioni, scongiurando i modi di dissesto più frequenti.

Miglioramento delle connessioni perimetrali

Consiste nell'ancoraggio degli orizzontamenti alle pareti perimetrali e/o nel miglioramento delle connessioni, da realizzare attraverso l'ancoraggio dell'orditura principale mediante barre metalliche fissate a capochiavi di vario tipo o bolzoni ripiegate all'interno della muratura, opportunamente rinforzata.

Interventi mirati al miglioramento dell'impalcato ligneo, come il rinforzo delle orditure lignee, che si rende necessario data l'insufficiente capacità dei solai tradizionali rispetto agli attuali carichi di esercizio sensibilmente superiori. Sono sconsigliati interventi "dal basso" che mirano al rinforzo delle travi esistenti, sia perché comportano in ogni caso l'introduzione di elementi nuovi che possono creare un forte impatto estetico in ambienti di così ridotte dimensioni come quelli del borgo, sia perché non sono state rilevate pavimentazioni di qualità tale da giustificare un loro divieto di rimozione. Sono ammessi interventi "dall'alto" che offrono la possibilità di applicare elementi di rinforzo sull'estradosso, previa rimozione e sostituzione della pavimentazione e del massetto esistenti, destinati a restare nascosti e consentono di conservare l'architettura del solaio.

Sovrapposizione di tavolato aderente a quello esistente

Questo intervento consiste nell'applicazione di un tavolato aderente a quello esistente, collegato ad esso tramite viti filettate, ma ordito in senso ortogonale così da ottenere un efficace irrigidimento e un aumento della sezione resistente. È da evitare l'intervento che prevede la realizzazione di una caldana in calcestruzzo armato su tutto il tavolato.

Scale

I corpi scala esistenti connotati da valori architettonici, tipologici o documentari, devono essere oggetto di conservazione, sia nelle parti strutturali, sia nelle caratteristiche architettoniche. Solo in caso di uno stato di danno elevato è ammessa la sostituzione integrale, fermo restando il massimo rispetto del materiale di recupero e l'utilizzo di materiale analogo o quantomeno compatibile con la tradizione locale.

Il rifacimento di corpi scala con materiale diverso dall'originale è consentito solo in presenza di materiali incongrui con la tradizione locale;

Sono ammesse modifiche necessarie ai fini dell'abbattimento delle barriere architettoniche o adeguamenti per migliorare la fruibilità delle cellule abitative, purché non creino gravi alterazioni della tipologia originaria.

È consentito l'inserimento di collegamenti verticali interni nel rispetto delle strutture esistenti. È vietato l'inserimento di collegamenti verticali interni negli ambienti voltati.

Coperture

Per le coperture valgono considerazioni analoghe a quelle dei solai, tenendo conto delle spinte che alcune tipologie di tetti a falda possono esercitare sulle pareti. L'inserimento di cordoli in muratura armata o in legno, sul colmo della muratura, è un intervento strutturalmente valido, per il comportamento strutturale d'insieme, ma occorre caso per caso valutarne la fattibilità in relazione alle caratteristiche architettoniche dell'opera.

Il rinforzo dei tetti spingenti richiede in genere l'inserimento di catene trasversali, disposte alla quota d'imposta del tetto; alla stessa quota possono essere disposti controventi orizzontali sempre realizzati con tiranti in acciaio, per il miglioramento del comportamento scatolare d'insieme. Anche le falde dei tetti possono essere irrigidite nel loro piano con la stessa metodologia vista per i solai in legno. È in linea generale opportuno il mantenimento dei tetti in legno, in quanto capaci di limitare le masse nella parte più alta dell'edificio e di garantire un'elasticità simile a quella della compagine muraria sottostante.

In generale, vanno il più possibile sviluppati i collegamenti e le connessioni reciproche tra la parte terminale della muratura e le orditure e gli impalcati del tetto, ricercando le configurazioni e le tecniche compatibili con le diverse culture costruttive locali. Oltre al collegamento con capochiave metallico, che impedisce la traslazione, si possono realizzare cordoli-tirante in legno o in metallo opportunamente connessi sia alle murature sia alle orditure in legno del tetto (cuffie metalliche), a formare al tempo stesso un elemento di connessione sul bordo superiore delle murature ed un elemento di ripartizione dei carichi concentrati delle orditure del tetto. Ove i tetti presentino orditure spingenti, come nel caso di puntoni inclinati privi di semicatene in piano, la spinta deve essere compensata. Nel caso delle capriate, deve essere presente un buon collegamento nei nodi, necessario a evitare scorrimenti e distacchi in presenza di azioni orizzontali.

Gli interventi sulle coperture devono essere effettuati previa verifica delle cause che hanno provocato i crolli e i dissesti. È ammessa la sostituzione integrale delle strutture, eventualmente con "tetti ventilati" o, comunque con strutture realizzate con materiali senza modifiche delle quote di gronda.

L'intervento prescelto deve essere finalizzato al miglioramento del comportamento strutturale, così da poter eliminare i fenomeni di martellamento sui setti murari; si devono prevedere una serie di operazioni che possano garantire sia la connessione tra i vari elementi che compongono

l'orditura, sia l'unione strutturale tra il tetto e la muratura, dando vita ad un sistema scatolare chiuso capace di annullare le spinte e comportarsi in maniera solidale in caso di azione sismica.

È vietata la trasformazione delle coperture a falde, o porzioni di esse, in coperture piane.

È consigliabile il ritorno alle coperture a falde (falda unica, a capanna o a padiglione) laddove siano state sostituite da coperture piane o terrazze, elementi estranei alla tradizione locale, fermo restando che si eseguano falde in cui pendenze, orientamento e quote di gronda siano tratte da documentazione archivistica o fotografica o da inequivocabili tracce riscontrabili sull'edificio.

Miglioramento delle connessioni interne

È previsto l'intervento sulle modalità di assemblaggio della carpenteria lignea del tetto per realizzare miglioramenti rilevanti nel comportamento sotto l'azione del sisma. Un collegamento efficace si può ottenere applicando un lamierino sotto l'appoggio a monte del travetto (sulla trave principale), da fissare con piccoli chiodi e da risvoltare e fissare sulla superficie della trave. Non è indispensabile realizzare questo vincolo su ogni travicello; è sufficiente fissarne solo uno ogni tre, a condizione che sull'estradosso si disponga una tavola trasversale di collegamento.

Interventi sulle orditure secondarie

Per rinforzare l'orditura secondaria e per recuperare la "deformata" dei travicelli, si possono disporre tavole sull'estradosso dei travicelli, fissate ad essi mediante viti autofilettanti, previo puntellamento degli stessi. Nello spazio fra le tavole così disposte si può inserire il materiale isolante, mentre, nella parte superiore si chiodano delle tavole diagonali per garantire una buona rigidità del piano di falda: questa soluzione si presta per creare tetti ventilati.

Inserimento di cordoli sommitali

Vanno in generale evitati i cordoli in cemento armato, per la diversa rigidità che essi introducono nel sistema strutturale, per la conseguente modifica nella distribuzione delle masse e per l'invasività dal punto di vista storico architettonico e l'incompatibilità chimica spesso presente.

Per ottenere un significativo miglioramento del comportamento d'insieme e, quindi, per far collaborare le strutture murarie, è necessario l'inserimento di cordoli sommitali. Sono comunque sconsigliati i cordoli in cemento armato "nascosti" all'interno della muratura in pietra. La soluzione più compatibile con la muratura tradizionale è rappresentata dai cordoli in muratura armata, che sono in grado di far fronte in modo equilibrato alle funzioni statiche richieste. Questi sistemi contengono le armature prescritte dalle norme, con la possibilità di incrementare la sezione dei tondini per assorbire la spinta sismica, ma vengono realizzati a strati e non attraverso un getto di

calcestruzzo. Ciò permette di ridurre la resistenza a taglio tra un filare e l'altro rendendo l'elemento molto più flessibile. Sono consentiti cordoli in acciaio (in reticolato).

Manti di copertura

Il manto di copertura deve essere realizzato utilizzando esclusivamente coppi in laterizio disposti in filari maritati a canale e coperchio, murati o semplicemente appoggiati o fissati attraverso elementi preferibilmente in rame (con ganci, fili, chiodi).

È ammesso l'uso di coppi di recupero ancora efficienti, disponendoli in maniera alternata e casuale o posizionando nello strato sottostante i nuovi elementi (compatibili per dimensioni e cromie) e quelli di recupero nello strato esterno;

È consigliabile la rimozione di eventuali manti non compatibili. È vietato l'utilizzo di tegole che riproducano le forme della tradizione utilizzando materiale diverso, come ad esempio, cemento, lamiera o impasti bituminosi e l'eventuale sostituzione del manto tradizionale in cotto con un altro costituito da tegole che presentano la parte piana e quella curva riunita in un unico pezzo, tipo "portoghesi" o "olandesi", o tegole piane "tipo marsigliesi";

Non dovranno essere lasciati a vista eventuali strati di guaina impermeabilizzante e/o di materiale coibente, facendo particolare attenzione alle linee di gronda ed ai profili delle falde. In caso di messa in opera di tetto ventilato con la necessità di realizzare sfati sul manto, è da evitare l'impiego di tubi che fuoriescono dal manto di copertura.

Possono, invece, essere utilizzati elementi aeratori (come cuffie e fraticini), opportunamente sagomati, compatibili con la tipologia tradizionale.

Comignoli

La struttura dei comignoli può essere realizzata con laterizi correnti, tagliati e sagomati secondo le esigenze, lasciati a faccia a vista, secondo i modelli della tradizione; sono ammesse soluzioni non tradizionali, in rame, purché inquadrati in un progetto unitario inerente l'intero fronte esterno o il sistema copertura.

Vanno comunque evitati comignoli prefabbricati in cemento di qualsiasi natura o forma, così come la costruzione di canne fumarie applicate sui fronti esterni. Nei casi di reale esigenza (ad esempio esercizi legati alla ristorazione) può essere consentita, previa attenta stima, su facciate non visibili dalla pubblica via.

Canali di gronda

I canali di gronda e i pluviali devono essere realizzati preferibilmente in rame. Lo spessore potrà variare in relazione alle dimensioni, alla conformazione e alle sollecitudini ambientali, in ogni caso non dovrà essere inferiore a 0,6 mm. Il posizionamento dei pluviali deve essere oggetto di particolare studio in relazione alla sezione compositiva del fronte esterno; in particolare si consiglia di inserirli in modo da rendere leggibile la scansione cellulare. Dove è possibile, è opportuno metterli in opera seguendo una linea verticale al confine della facciata, prevedendo l'uso di un unico elemento per due fabbricati contigui e cercando di non nascondere alla vista particolari architettonici e decorativi.

Abbaini e lucernari

È escluso qualsiasi tipo di intervento volto all'apertura di abbaini e lucernari.

Elementi secondari

Vanno considerati con particolare attenzione dal punto di vista strutturale alcuni elementi, così detti secondari, quali i comignoli, i cornicioni, le gronde, le lastre di rivestimento delle facciate, che però sono comunque importanti per l'incolumità delle persone. In particolare le lastre di rivestimento si possono staccare con una certa facilità dalle pareti in muratura dissestata, anche in relazione all'invecchiamento delle malte ed all'ossidazione delle staffe o grappe di collegamento. Gli interventi, soprattutto in zona sismica, consistono essenzialmente nel ristabilire un collegamento efficace utilizzando tecniche appropriate, come l'inserimento di chiodi, di grappe, di staffe; queste possono essere integrate, ed in alcuni casi anche sostituite, da malte o colle speciali.

Infissi

In generale, gli interventi devono favorire la conservazione delle finestre (o porte finestre) e dei relativi sistemi di oscuramento, porte e portoni che denunciano elementi tipologici o costruttivi attribuibili a modelli e a tecniche della tradizione locale.

Laddove non sia possibile operare un restauro di tipo conservativo, a causa di uno stato di danno molto avanzato o ai costi di realizzazione troppo alti in rapporto al valore dell'oggetto è consentita, previo studio dell'originale, la sostituzione. Il nuovo elemento deve preferibilmente, mantenere i

caratteri morfologici originali, utilizzando modelli, lavorazioni, materiali, colori e tecnologie costruttive analoghe o quantomeno compatibili con la tradizione. Il materiale ammesso è esclusivamente il legno con verniciatura nei colori tradizionali. Il colore, quando non diversamente documentato, deve essere desunto dalle tracce originali.

L'unica tipologia ammessa per i sistemi di oscuramento sono gli scuri interni; gli altri sistemi, se presenti, vanno eliminati e sostituiti.

È vietata la messa in opera di doppie finestre posizionate sul filo esterno del fronte o comunque esternamente all'infisso originario.

È consentita la variazione dello spessore del telaio esistente con lo scopo di inserire vetri-camera, vetri di sicurezza o antisfondamento. È ammessa la sostituzione di porte e portoni con infissi vetrati, se compatibili con l'impostazione architettonica della facciata;

Messa in sicurezza degli infissi in vetro

Per gli infissi in vetro di cui fosse necessaria la messa in sicurezza, si dovrà far riferimento ad infissi per i quali sia garantita la rottura ed espulsione di lastre in vetro. A tal fine si devono prevedere adeguati accorgimenti nel telaio dell'infisso, in modo che questo possa subire notevoli deformazioni a seguito del sisma, senza che tali deformazioni si scarichino sulla lastra in vetro. Tale obiettivo è facilmente ottenibile con profilati estrusi in lega di alluminio, da utilizzare comunque solo se compatibili sotto il profilo architettonico. Nel caso di infissi tradizionali, tale risultato può comunque essere ottenuto in presenza di adeguati sistemi di fissaggio del vetro stesso.

Manutenzione degli infissi recuperabili

Qualora gli infissi siano in condizioni tali da permetterne la conservazione, vanno previsti interventi di manutenzione e miglioramento delle caratteristiche prestazionali.

Elementi in ferro lavorato

Devono essere salvaguardati e valorizzati tutti gli elementi in ferro lavorato (come grate di finestre, ringhiere, grate, roste di sopraluci), di corredo e/o di finitura che presentino caratteri storico tipologico riconducibili alla tradizione. La parziale o totale sostituzione è ammessa solo in caso di documentata irrecuperabilità; in tal caso devono essere impiegati materiali, forme, cromie, finiture e tecniche esecutive dell'elemento originale. In generale, salvo casi documentati, la colorazione degli elementi in ferro lavorato deve essere al naturale, con verniciatura opaca di protezione.

Impianti tecnologici

Tutte le installazioni d'impianti tecnologici, di qualsiasi entità e natura devono rispettare l'architettura della facciata e introdurre la minima alterazione possibile.

In generale, si richiede di riorganizzare i cavi della rete elettrica e telefonica, cercando di nasconderli. I cavi possono essere: posti sotto traccia; racchiusi in guaine di rame o in materiale simile, comunque capace di invecchiare nel tempo. In entrambi i casi, vanno posizionati o secondo una linea verticale, in corrispondenza dei limiti delle unità edilizie - che non necessariamente corrispondono ai confini delle proprietà celate dai discendenti di gronda; o secondo linee orizzontali, in corrispondenza del canale di gronda.

Le condutture di acqua, gas e simili devono essere posizionate sotto traccia. Nel caso non fosse possibile metterli sotto traccia, devono essere collocati il più vicino possibile alle sporgenze del manufatto architettonico. I contatori devono essere alloggiati in vani disposti all'interno del manufatto architettonico.

Non è consentita l'installazione in facciata dei terminali esterni di impianti di condizionamento d'aria, di refrigeramento e di qualunque impianto tecnologico. Non sono ammesse in facciata prese d'aria per i camini o caldaie, nonché impianti per l'essiccazione dei fumi e dei vapori. Nel caso di effettiva necessità, devono essere realizzate rispettando la grammatica del fronte ed unicamente a raso facciata senza alcun rilievo.

3.1 Impostazione dell'intervento sull'edilizia storica

3.1.1 Fase analitica

La scelta di intervenire ed come intervenire deve essere frutto di un'attenta analisi che pervenga ad una sintesi delle conoscenze necessarie per un giudizio sulla sicurezza di una costruzione: l'analisi storica, l'osservazione diretta dei quadri fessurativi, le indagini sperimentali sulla qualità dei materiali e degli elementi strutturali, l'analisi del comportamento strutturale.

Le conoscenze e le tecniche disponibili permettono al progettista di avere diverse opzioni di fronte ad ogni singolo problema. I criteri di scelta nel caso di costruzioni storiche, devono pertanto essere guidati non solo dall'efficacia strutturale e dall'economia ma anche, e soprattutto, dalla conoscenza delle tecniche e tecnologie del passato impiegate nella costruzione dell'edificio o del monumento, visto nella sua completa evoluzione storica.

La raccolta delle informazioni tratte dalla ricerca sull'edificio deve infatti comprendere un'indagine volta alla ricostruzione della storia del cantiere e delle fasi della costruzione del manufatto, oltre a ricostruire le vicende e gli eventi che hanno interessato l'edificio nel corso della sua esistenza. Tra le informazioni ottenibili ciò consentirà, infatti, di evidenziare le lacune e le discontinuità (o anche le sconnesioni) originarie, distinguendole da quelle acquisite in tempi successivi, elementi questi fondamentali sia per una corretta modellazione numerica sia per l'analisi dei possibili meccanismi di collasso.

Di particolare importanza è l'osservazione delle lesioni e delle deformazioni, che rappresentano infatti le tracce fisiche dei meccanismi di dissesto che sono attivati, anche se solo parzialmente.

Le prove che si devono effettuare sono atte ad ottenere informazioni precise e puntuali su particolari aspetti: l'esame della consistenza e della fattura all'interno dello spessore murario, lo stato tensionale di un paramento, le caratteristiche fisico-mechaniche dei materiali, la presenza di vuoti e discontinuità non visibili esternamente, il livello di iniettabilità di un maschio murario, la deformabilità di un solaio, le caratteristiche dinamiche di un elemento strutturale, ecc.

La conoscenza che si intende raggiungere può infatti essere conseguita con diversi livelli di approfondimento, in funzione dell'accuratezza delle operazioni di rilievo, delle ricerche storiche, e delle indagini sperimentali.

Facendo il ragionamento inverso, tali indagini saranno funzionali al livello di conoscenza voluto e andranno ad interessare tutto o in parte l'edificio, a seconda della tipologia dell'intervento previsto.

Il livello di conoscenza raggiunto andrà ad esplicarsi in un fattore detto "Coefficiente di Confidenza" e previsto dalle ultime normative. In particolare, nel caso di edifici storici è necessario far riferimento alle tabelle del coefficiente di Confidenza riportate nelle linee guida dei Beni Culturali (più dettagliate delle schede presentate nelle NTC).

Il rilievo materico-costruttivo deve permettere di individuare completamente l'organismo resistito della fabbrica, tenendo anche presente la qualità e lo stato di conservazione dei materiali e degli elementi costitutivi.

Tale riconoscimento richiede l'acquisizione di informazioni spesso nascoste (da intonaci, controsoffitti, ecc.), che può essere eseguita grazie a tecniche di indagine non distruttive di tipo indiretto (termografia, georadar, tomografia sismica, ecc.) o ispezioni dirette di tipo distruttivo (endoscopie, scrostamenti di intonaci, strappi d'intonaco localizzati nelle giunzioni tra setti murari, saggi, piccoli scassi, ecc.). Un aspetto rilevante è la scelta del numero, della tipologia e della localizzazione delle prove da effettuare. Per una corretta conoscenza essa dovrebbe essere adottata in modo diffuso, ma per il loro eventuale impatto economico, esse andranno impiegate solo se ben motivate, ovvero se utili nella valutazione e nel progetto dell'intervento. Al fine di limitare al massimo l'impatto di queste indagini è fondamentale avere un'approfondita consapevolezza delle caratteristiche costruttive dei manufatti nell'area e nei diversi periodi storici, in modo tale da poter far ricorso a caratteristiche desumibili dalla regola dell'arte.

Come è ormai noto alla cultura della conservazione, considerata una notevole varietà di materiali e tecniche, sia al livello geografico che storico, è utile definire regole dell'arte locali cui far riferimento per il giudizio di qualità di una muratura.

La lettura di uno schema strutturale di funzionamento della fabbrica necessita quindi di una conoscenza dei dettagli costruttivi e delle caratteristiche di collegamento tra diversi elementi, e anche la relativa caratterizzazione di tali elementi. Tale lettura può essere riassunta nei seguenti prime indagini e verifiche:

- tipologia della muratura (in mattoni, in pietra - quadrata, sbazzata, a spacco, ciottoli - omista, a paramento unico, adue o più paramenti) e caratteristiche costruttive (tessitura regolare o irregolare; con o senza collegamenti trasversali, ecc.);
- qualità del collegamento tra pareti verticali (ammorsamento nei cantonali e nei martelli, catene, ecc.);
- qualità del collegamento tra orizzontamenti (solai, volte e coperture) e pareti, con rilievo dell'eventuale presenza di cordoli di piano o di altri dispositivi di collegamento (catene, ecc.);

- elementi di discontinuità determinati da cavetti di canne fumarie etc.
- tipologia degli orizzontamenti (solai, volte, coperture), con particolare riferimento alla loro rigidità nel piano;
- tipologia ed efficienza degli architravi al di sopra delle aperture;
- presenza di elementi strutturalmente efficienti atti ad equilibrare le spinte eventualmente presenti;
- presenza di elementi, anche non strutturali, ad elevata vulnerabilità.

Speciale attenzione dovrà essere riservata alla valutazione della qualità muraria, in particolare di significativa importanza risulta essere:

- la presenza di elementi trasversali (denominati diaconi), di collegamento tra i paramenti murari e la forma, tipologia e dimensione degli elementi;
- il riconoscimento di una disposizione regolare e pressoché orizzontale dei corsi, la buona tessitura, ottenuta tramite l'ingranamento degli elementi (numero ed estensione dei contatti, presenza di scaglie) ed il regolare sfalsamento dei giunti;
- la natura delle malte ed il loro stato di conservazione.

3.1.2 Strategie per l'intervento di miglioramento

Con il termine di "miglioramento" si deve intendere l'esecuzione di opere in grado di far conseguire all'edificio un maggior grado di sicurezza rispetto alle azioni sismiche con un livello di protezione sismica non necessariamente uguale a quello previsto per le nuove costruzioni.

La scelta della strategia e della tecnica d'intervento, nonché l'urgenza di attuarlo, dipendono dai risultati della precedente fase di valutazione.

L'intervento deve essere realizzato solo dopo aver accertato i benefici che possono conseguirsi nell'impatto sulla costruzione storica. In particolare devono, in via generale, essere evitate tutte le opere di demolizione - sostituzione e di demolizione-ricostruzione, operando con interventi che si integrino con la struttura esistente senza trasformarla radicalmente. In situazioni di emergenza si può derogare da questa condizione, adottando tuttavia soluzioni provvisorie con alterazioni permanenti.

L'obiettivo principale resta sempre la conservazione non solo della materia, ma anche del funzionamento strutturale accertato, qualora questo non presenti carenze tali da poter comportare la perdita del bene. Il progetto degli interventi dovrà garantire la conservazione dell'architettura in tutte le sue declinazioni.

La valutazione della sicurezza e l'eventuale scelta dell'intervento non possono essere effettuate solo su base analitica, ma si devono basare su un processo di sintesi tenendo conto degli aspetti oggettivi e soggettivi che caratterizzano ciascuna delle tre fasi generalmente seguite nello studio di un edificio storico: 1) l'analisi storica, estesa a tutte le fasi di vita dell'edificio; 2) l'osservazione diretta, con l'eventuale supporto di indagini e monitoraggio; 3) l'analisi strutturale, tenendo ben presente che in quest'ultimo processo l'oggettività degli sviluppi teorici non garantisce l'oggettività delle conoscenze, essendo realtà filtrata dalla soggettività sia nella scelta che nella definizione degli schemi.

La valutazione della sicurezza ed una chiara comprensione della struttura devono essere alla base delle decisioni e delle scelte degli interventi. In particolare, l'intervento dovrà essere proporzionato agli obiettivi di sicurezza e durabilità, contenendo gli interventi in modo tale da produrre il minimo impatto sul manufatto storico. La scelta delle tecniche d'intervento sarà valutata caso per caso, dandole preferenza a quelle meno invasive e maggiormente compatibili con i criteri della conservazione, tenendo conto dei requisiti di sicurezza e durabilità. Gli interventi dovranno quindi, per quanto possibile, rispettare la concezione e le tecniche originarie della struttura, nonché le trasformazioni significative avvenute nel corso della storia del manufatto.

L'intervento dovrà essere valutato anche in ragione del suo costo, rapportandolo all'entità del beneficio da esso prodotto ed all'effettiva necessità.

L'intervento non deve essere finalizzato solo al raggiungimento di un appropriato livello di sicurezza della costruzione, ma deve anche tendere al rispetto/raggiungimento di principi/obiettivi rivolti ad un "miglioramento controllato" e riassumibili nei seguenti punti:

- Alterare il meno possibile l'originale distribuzione delle rigidità negli elementi
- Valutare l'interferenza degli interventi con gli apparati decorativi
- Evitare, per quanto possibile, sostituzioni e ricostruzioni
- Rinforzo degli elementi resistenti originari
- Limitato inserimento di nuovi elementi
- Inserimento di protezioni passive
- Riduzione delle masse
- Limitazione o cambiamento di destinazioni d'uso (cercando usi con minori carichi di esercizio)

- Non inserire impianti negli elementi strutturali originari (ovvero non alterare le sezioni resistenti)
- Ogni materiale aggiunto/inserito deve garantire la compatibilità e durabilità in rapporto alle caratteristiche chimico fisiche della materia storica
- Operare per l'integrazione e non la trasformazione della struttura
- Rispetto di concezioni e tecniche originarie della struttura
- Se possibile, reversibilità o rimovibilità
- Limitare l'estensione degli interventi
- Conservare sia la materia che il comportamento strutturale accertato (se non è carente)

Il progetto del sistema di rinforzo deve presupporre i seguenti requisiti fondamentali:

- I rischi ai quali la struttura potrebbe essere soggetta vanno accuratamente individuati, eliminati o attenuati;
- la configurazione del rinforzo deve risultare poco sensibile ai suddetti rischi;
- la stessa configurazione deve inoltre sopportare l'occorrenza di danneggiamenti localizzati;
- sistemi di rinforzo che collassino senza segnali di preavviso vanno opportunamente evitati.

Nel soddisfare i requisiti fondamentali sopra definiti occorre garantire:

- la scelta di materiali opportuni;
- un progetto adeguato con un'accorta cura dei particolari costruttivi;
- la definizione, nell'ambito di ogni intervento, di procedure di controllo per la progettazione, la produzione, l'esecuzione e l'uso.

Qualora il rinforzo strutturale riguardi costruzioni di interesse storico e monumentale, si richiede sempre una valutazione critica dell'intervento rispetto ai canoni della conservazione e del restauro.

3.1.3 La reversibilità nel consolidamento

Il restauro tende a privilegiare interventi che siano reversibili, o in altre parole che possono essere eliminati o migliorati nel futuro.

Questo principio è corretto in quanto le decisioni non sempre sono prive di errore e quindi sarebbe illogico escludere la possibilità di utilizzare in futuro tecniche, tecnologie e materiali più appropriati in futuro.

È importante ricordare, comunque, che la reversibilità si deve considerare come una preferenza nelle scelte progettuali, piuttosto che un requisito assoluto.

Situazioni nelle quali la reversibilità non è né possibile né raccomandabile non sono inusuali.

Una di queste, ad esempio, è rappresentata dal consolidamento (rigenerazione) della muratura dissestata mediante iniezioni; questa tecnica irreversibile, è, in ogni caso, assai meno traumatica ed invasiva della vecchia tecnica dello scuci-cuci, che comporta demolizioni e ricostruzioni parziali della muratura.

La rigenerazione muraria, mediante iniezioni ed impregnazioni di malte idrauliche chimicamente compatibili con le malte storiche (in genere vanno utilizzate malte di tipo pozzolanico), è l'intervento fondamentale per il miglioramento di murature degradate, contesti irregolari e nucleo interno non ben legato. Il miglioramento della qualità muraria è inoltre in molti casi una condizione indispensabile per l'applicabilità e l'ancoraggio di molte tipologie di interventi di rinforzo, tra le quali quelle volte al miglioramento del comportamento strutturale d'insieme.

3.2 TIPOLOGIE DI INTERVENTO PER IL CONSOLIDAMENTO DI EDIFICI IN MURATURA

Criteri generali

Gli interventi in genere sono rivolti ad un incremento della capacità resistente dei diversi elementi strutturali; capacità resistente che deve essere commisurata all'entità dei carichi in gioco. È opportuno comunque migliorare il comportamento d'insieme della struttura prima di studiare gli interventi per i singoli elementi strutturali.

Nella valutazione del comportamento strutturale d'insieme occorre mettere in conto sia i carichi di esercizio, conseguenti alla destinazione d'uso prevista e spesso mutati rispetto all'epoca della realizzazione originaria, sia i carichi esterni come l'azione sismica.

L'obiettivo da perseguire con gli interventi di consolidamento è quello di ottenere per le parti della muratura un comportamento monolitico e gli strumenti per ottenere questo sono diversi a seconda della situazione da cui si parte.

Gli interventi di consolidamento vanno applicati, per quanto possibile, in modo regolare ed uniforme alle strutture; l'esecuzione di interventi localizzati su porzioni limitate dell'edificio va opportunamente valutata (possibilmente evitata) e giustificata calcolando l'effetto di interminidivariazione nella distribuzione della rigidità; particolare attenzione deve essere posta anche alla fase esecutiva degli interventi, onde assicurare l'efficacia degli stessi.

La ricerca del miglioramento del comportamento strutturale globale dell'edificio deve essere legata ed orientata alla ricerca ed alla verifica dell'ottenimento di un comportamento scatolare d'insieme. Il comportamento scatolare d'insieme è fondamentale al fine di evitare il formarsi di meccanismi locali ed assicurare una corretta distribuzione delle azioni esterne orizzontali (sisma, vento) in proporzione alle rigidità dei diversi elementi strutturali.

Una volta assicurata una risposta globale della struttura si può procedere con la valutazione dei possibili interventi di incremento resistenza.

Come vedremo nel seguito, gli interventi si possono distinguere in interventi di rinforzo statico, legati in genere alla destinazione d'uso prevista per l'edificio oltre che a manomissioni ed indebolimenti strutturali avvenuti nel passato, ed interventi rivolti ad un miglioramento sismico, per quanto si possa affermare come siacomunque opportuno ricercare soluzioni che soddisfino al contempo entrambe le problematiche.

In generale, gli interventi devono in primo luogo assicurare (o ripristinare) una buona continuità ed efficaci collegamenti tra i vari elementi strutturali (pareti, solai, tetti, ecc.). Per quanto riguarda in

particolare l'azione sismica, concettualmente si possono individuare due strade: migliorare il comportamento strutturale o ridurre gli effetti del sisma.

Si può comunque rilevare che, se da un punto di vista teorico si rinforza la struttura o si dissipa l'energia porta allo stesso miglioramento del livello di sicurezza, da un punto di vista pratico spesso il primo tipo di intervento è più facilmente realizzabile.

Nel riassumere e sistematizzare quanto detto finora, le modalità d'intervento impiegate nei recuperi strutturali e gli interventi di miglioramento sismico possono essere distinti sia per tipologie di intervento (impiego di determinati materiali), sia sulla base delle diverse tipologie di strutture ed elementi strutturali su cui è necessario intervenire, nonché in base alla "filosofia" d'intervento (interventi puntuali o diffusi, di rinforzo delle resistenze o di riduzione delle azioni, ecc.).

La valutazione della qualità delle murature deve essere propedeutica a qualunque analisi od ipotesi di intervento ed è di fondamentale importanza per un corretto riferimento al modello di comportamento per macroelementi.

Prima di porsi il problema dell'individuazione di zone di muratura che rimangono solidali durante l'asollecitazione dinamica, occorre infatti stabilire se tale muratura è realmente in grado di comportarsi in maniera monolitica, ed in caso negativo occorre provvedere a quanto occorre per raggiungere tale obiettivo.

La valutazione dell'efficienza strutturale di una muratura non si può basare solo sui valori di resistenza meccanica, ma deve essere integrata con l'esame dell'apparecchiatura, dello stato delle malte, ed della qualità dell'inerte. Si tratta quindi di un confronto da operare con riferimento ad abachi che riportano le diverse tipologie murarie e le loro caratteristiche strutturali, abachi in parte presenti nelle ultime normative.

Letecniche d'intervento tradizionali

I criteri e letecniche utilizzate nelle antiche costruzioni sono spesso più efficaci e resistenti di quanto possa apparire a prima vista; infatti occorre tener presente che, ad esempio, la deformabilità della muratura, prodotta da un reticolo di fessure e piccole lesioni, non sempre compromette la stabilità, ma permette alla struttura di adattarsi a fattori come le variazioni termiche e piccole assestamenti del suolo; inoltre anche quadri fessurati e diffusi non sempre sono indice di dissesto: gli archi, le volte e le cupole hanno una eccezionale capacità portante e sono in grado di assolvere la loro funzione, anche quando severamente danneggiati.

Il legno può utilizzarsi intelligentemente, non solo per realizzare tetti e solai, ma anche per costituire incatenamenti, in grado di bilanciare la spinta delle volte, o migliorare la continuità ed il collegamento tra le pareti.

L'impiego di materiali tradizionali e delle tecniche antiche nel restauro è pertanto appropriato non solo per mantenere il valore storico della costruzione, ma anche come metodo tecnicamente corretto ed intelligente per ripristinare condizioni soddisfacenti di sicurezza ed efficienza strutturale. Le tecniche e le pratiche costruttive del passato non sono tuttavia prive di errori.

Occorre infatti tenere presente che in moltissimi casi non è comunque possibile applicare le tecniche tradizionali. Questo accade ogni qual volta il miglioramento strutturale richiesto (o voluto) non è compatibile con le caratteristiche meccaniche dei materiali tradizionali.

Le tecniche d'intervento moderne

L'uso eccessivo e indiscriminato delle nuove tecniche e tecnologie nel campo del restauro ha portato ad una riconsiderazione dei benefici e ad una maggiore attenzione agli svantaggi che il loro uso può comportare.

Oggi è chiaro che le nuove tecniche si debbono usare con cautela, poiché possono produrre anche danni irreversibili.

Le tecniche moderne, tuttavia, se utilizzate appropriatamente, possono offrire soluzioni eccezionali ed effettivamente aiutare nel preservare il nostro patrimonio architettonico.

Uno dei problemi più importanti nel restauro delle costruzioni storiche è spesso rappresentato dalla necessità di conferire una certa resistenza a trazione.

I materiali moderni (acciai speciali, inossidabili o auto passivanti; fibre sintetiche, ecc.) possono fornire una alternativa interessante ed efficace alle catene degli elementi di legno, utilizzati frequentemente nel passato.

Le tecnologie innovative

Nei tempi più recenti si sono sviluppate alcune tecnologie d'avanguardia, spesso applicate in modo diverso da quelle del restauro, ma che hanno trovato poi in questo settore applicazioni di estremo interesse. Tra queste citiamo:

resine quelle più comunemente usate sono quelle epossidiche;

materiali compositi sono costituiti da una matrice di resine polimeriche (epossidiche, poliestere, viniliche, ...) o di malte inorganiche (pozzolaniche) fibrorinforzate, in cui sono immerse fibre sintetiche (vetro, aramide, carbonio, basalto), che conferiscono la resistenza al

composito. Come tutte le tecnologie innovative si deve tuttavia fare attenzione a possibili *effetti collaterali negativi* come, ad esempio, la *sensibilità ai raggi ultravioletti*;

Acciai speciali hanno fatto grandi progressi conseguendo non solo eccezionali resistenze, ma anche buona durabilità e compatibilità con le costruzioni storiche, come ad esempio gli acciai inossidabili e del titanio. Interessanti sono anche i cosiddetti *acciai "a memoria di forma"* (shape memory alloy);

Apparecchi viscosi oleodinamici (shock transmitters);

Questi apparecchi consentono di accoppiare due elementi strutturali (ad esempio un solaio ed una parete) in modo da consentire le deformazioni relative lente, come le deformazioni termiche o quelle indotte da cedimenti del suolo, mentre si comportano rigidamente, costituendo quindi vere e proprie vincoli, in caso di azioni dinamiche veloci, come il sisma.

3.3 OPERAZIONI E TECNICHE DI INTERVENTO

Nel seguito sono fornite indicazioni generali per la scelta degli interventi di miglioramento sismico degli edifici in muratura, con riferimento ad alcune tecniche di utilizzo corrente. Gli interventi possibili per ciascuna patologia o forma di vulnerabilità sono generalmente più d'uno, con caratteristiche diverse in termini di efficacia, invasività, reversibilità, compatibilità, durabilità e costi. Gli interventi si possono distinguere in vari gruppi a seconda del loro obiettivo e della loro importanza.

Interventi volti a ridurre le carenze dei collegamenti

Alla fine di garantire un comportamento globale ottimale dell'edificio è necessario che gli interventi siano mirati ad assicurare alla costruzione un soddisfacente comportamento d'insieme, mediante la realizzazione di un buon morsa mento tra le pareti e l'efficace collegamento delle isole ai pareti; inoltre, deve essere verificato che le eventuali spinte prodotte da strutture voltate siano efficacemente contrastate e deve essere corretto il malfunzionamento dei tetti spingenti. La realizzazione di questi interventi è un prerequisito essenziale per l'applicazione di gran parte dei metodi di analisi sismica globale dell'edificio, che si basano sul comportamento delle pareti murarie nel proprio piano, presupponendo la stabilità nei riguardi di azioni sismiche fuori dal piano.

Inserimento di tiranti metallici

Nel caso di edifici in muratura con più piani, le catene vanno in genere collocate in corrispondenza dei solai (orizzontamenti di piano) e posizionate al di sotto del pavimento.

Come criterio basato da perseguire, quando possibile e obbligatoriamente nell'ipotesi di solai che non garantiscano adeguato contrasto all'azione di compressione (per fessurazione, per carenza della dimensione, ecc.), le catene vanno posizionate (generalmente all'livello dei solai) in adiacenza ai muri trasversali, sia perché essi sono in grado di contrastare in maniera efficace il tiro, sia perché in tal modo si consegue un efficiente collegamento puntuale tra pareti ortogonali.

La disposizione più efficace è costituita da una coppia di catene gemelle (catene binate) poste in parallelo, lateralmente allo stesso muro.

Il dimensionamento dei capichiave deve tener conto delle caratteristiche dell'elemento murario (muro, colonna, pilastro) collegato. Spesso risulta necessario un consolidamento locale della muratura, nell'azona di ancoraggio, ma, come detto in

precedenza, è ancorameglio procedere ad unarigenerazione muraria di tutele pareti portanti quando l'apparecchiatura è scadente.

I capichiave sono generalmente lasciati a vista, soltanto in alcuni casi (edifici di interesse storico-monumentale) possono essere "nascosti" ed allocati in tasche di intaglio all'uopo realizzate nella muratura e successivamente mascherati con sovrapposizione di protesi in elementi lapidei, opere a stucco e ademplici inserti di intonaco. Ad ogni modo, dove è possibile è sempre consigliabile l'impiego di capichiave esterni (appositamente progettati non solo per la funzione strutturale ma anche per quella estetica).

Ogni catena deve essere dimensionata, oltre che in funzione della resistenza a trazione del materiale metallico di cui è costituita, anche con una sezione trasversale rapportata alla lunghezza, che ne assicuri un'adeguata rigidità, nonché essere sottoposta ad uno stato di tensione commisurato a:

- entità del tiro in esercizio;
- valutazione dell'entità delle cadute di tensione nel tempo;
- azioni locali (all'interfaccia capochiave - muratura di assestamento) compatibili con le capacità resistenti locali delle parti murarie che forniscono il contrasto.

Tiranti disposti nelle due direzioni principali del fabbricato, al livello dei solai e in corrispondenza delle pareti portanti, ancorati alle murature mediante capochiave, forniscono un efficace vincolo contro il ribaltamento fuori piano dei pannelli murari e conferiscono un elevato grado di connessione tra le murature ortogonali, tale da favorire il comportamento d'insieme del fabbricato.

Nella realizzazione degli incatenamenti trasversali si possono anche sfruttare le travi dei solai esistenti come tiranti, collegandole con opportuna ferramenta a capochiave esterni.

E' da valutare con attenzione il ricorso agli ancoraggi per aderenza (mediante iniezioni di resine o malte a base cementizia nella muratura), sia per le possibili incompatibilità tra i materiali che per la difficoltà di controllare l'efficacia dell'ancoraggio.

I capichiave a paletto non vengono mai posti in opera in posizione verticale o orizzontale.

Il loro orientamento deve essere scelto in funzione delle reazioni che possono fornire le strutture (i blocchi lapidei) poste ad immediato contatto.

Cerchiature esterne

Cerchiature esterne con elementi metallici o materiali compositi, possono garantire un efficace collegamento tra murature ortogonali nel caso di edifici di dimensioni ridotte, dove i tratti rettilinei della cerchiatura non sono troppo estesi, o quando vengono realizzati ancoraggi in corrispondenza

dei martelli murari. È opportuno disporre elementi ripartitori (piastre angolari) per evitare l'insorgere di concentrazioni di tensioni in corrispondenza degli spigoli delle murature.

Ad ogni modo, questo genere d'intervento è ingeneresconsigliabile per invasività e per scarsa efficacia. È adatto per opere provvisorie per piccoli edifici o strutture particolari (cupole, torri).

Perforazioni armate

Le perforazioni armate devono essere limitate ai casi in cui non siano percorribili altre soluzioni, per la notevole invasività di tali elementi e la dubbia efficacia, specie in presenza di murature a più paramenti collegati; in ogni caso dovranno essere garantita la durabilità degli elementi inseriti (acciaio inox, materiali compositi o altro) e la compatibilità delle malte iniettate. Si precisa che questi interventi di collegamento locale sono efficaci per il comportamento d'assieme della costruzione solo in presenza di murature di buone caratteristiche, mentre sono sconsigliate per le murature scadenti e comunque irregolari, come accade nella maggior parte dei casi nell'edilizia storica di Castelvecchio Subequo, dove è preferibile l'adozione di tiranti, che garantiscono un collegamento complessivo.

Collegamenti tra pareti e solai

È possibile, in generale, considerare il solaio come elemento strutturale atto a conseguire il richiesto mutuo incatenamento delle pareti murarie; tale soluzione strutturale è stata ampiamente utilizzata anche dai costruttori delle epoche passate.

Conte le tecniche si utilizzano le travi in legno e/o metalliche costituenti gli elementi portanti degli orizzontamenti di piano (solai) e relativi sistemi di ancoraggio alle pareti murarie: esse si vincolano per mezzo della posatura di chiavarda, capichiave, ancoraggi a morsa, alle murature portanti parallele all'orditura ed alle murature di vincolo ortogonali all'orditura, contribuendo a solidarizzare mutuamente l'impianto murario portante verticale complessivo costituito dai muri perimetrali e/o di spina su cui sono impostati gli orizzontamenti.

Più recentemente tale tecnica è stata sviluppata anche con l'utilizzo di tecnologie e materiali innovativi con l'adozione di ancoraggi (flocchi) realizzati in materiali compositi (fibre in carbonio, fibre metalliche ad elevata resistenza meccanica) con matrici epossidiche, collegati/incollati alle travi lignee e rivoltati con formazioni di testate di contrasto sulla superficie esterna della parete muraria attraversata per l'impennazione.

La possibilità di utilizzare i solai, opportunamente ancorati alle murature, come elementi utili anche a svolgere la funzione aggiuntiva di incatenamento delle pareti murarie, deve essere valutata attentamente anche in funzione della qualità muraria delle pareti di ancoraggio, dello stato conservativo delle stesse travi portanti e dell'effettiva capacità degli orizzontamenti (solai) di restituire un comportamento a diaframma rigido nel proprio piano. Nel caso un'accurata indagine preventiva (saggi) rivelasse un deficit delle qualità richieste, si procederà all'esecuzione propedeutica delle opere di pre-consolidamento delle murature (sostruzione muraria nella zona di attestamento, iniezioni, ecc.) e di consolidamento dei solai, atte a garantire l'efficienza prestazionale delle travi (protesi, sostituzione parziale di elementi compromessi, ecc.) e la restituzione del comportamento statico richiesto (diaframma rigido).

In alternativa è sempre preferibile adottare le altre soluzioni tecniche proposte per gli incatenamenti (cfr.: catene, tiranti, controventi orizzontali).

Scucie e cucù

L'intervento di cucie e cucù è un intervento molto invasivo e costoso, quindi prima di pensare a tale intervento bisogna vedere se si può risolvere in altro modo il problema della sconnessione, danneggiamento e allentamento di un pannello murario.

Cordoli in sommità

Cordoli in sommità alla muratura possono costituire una soluzione efficace per collegare le pareti, in una zona dove la muratura è meno coesa a causa dei limitati livelli di compressione, e per migliorare l'interazione con la copertura. Questi cordoli possono essere realizzati in muratura armata, consentendo di realizzare il collegamento attraverso una tecnica volta alla massima conservazione delle caratteristiche murarie esistenti.

Questi cordoli, infatti, devono essere realizzati con una muratura a tutto spessore e di buone caratteristiche; in genere la soluzione più naturale è l'uso di una muratura in mattoni pieni. All'interno, nei giunti orizzontali, deve essere alloggiata un'armatura metallica in materiale composito, resa aderente alla muratura del cordolo tramite conglomerato pozzolanico fibrorinforzato.

Il collegamento tra il cordolo e la muratura sottostante può essere ingeneramente garantito dall'aderenza, l'ingranamento e l'attrito (in alcuni casi può essere opportuno eseguire un consolidamento della muratura sommitale della parete, ad esempio tramite iniezioni di malta).

Perfori armati, disposti con andamento verticale, sono impiegabili previa rigenerazione della muratura sottostante.

In alternativa alla muratura armata, quando è necessaria una prestazione meccanica superiore si possono impiegare cordoli in acciaio: rappresentano una valida alternativa per la loro leggerezza, la limitata invasività e la reversibilità. Essi possono essere eseguiti in due diversi modi: a) attraverso una struttura reticolare, in elementi angolari e piatti metallici, posti a sommità e collegati tramite perfori armati; b) tramite piattino profilato a U e paramenti, posti poco al di sotto della sommità della muratura e collegati tra loro con barre passanti. In presenza di muratura di scarsa qualità, l'intervento deve essere accompagnato da un'opera di bonifica e rigenerazione della fascia di muratura interessata. Il collegamento del cordolo alla muratura, opportunamente consolidata se necessario, viene eseguito tramite perfori armati. I cordoli metallici si prestano particolarmente bene al collegamento degli elementi lignei della copertura e contribuiscono all'eliminazione delle eventuali spinte.

Interventi di riabilitazione delle spinte di archi, volte e architravi, nonché alloro consolidamento

Gli interventi sulle strutture ad arco a volta possono essere realizzati con il ricorso alla tradizionale tecnica delle catene, che compensino le spinte indotte sulle murature di appoggio e ne impediscano l'allontanamento reciproco.

Le catene andranno poste in norma all'ere di archi e volte. Qualora non sia possibile questa disposizione, si potranno collocare le catene a livelli diversi purché ne sia dimostrata l'efficacia nel contenimento della spinta.

Tali elementi devono essere dotati di adeguata rigidità (sono da preferirsi barre di grosso diametro e lunghezza, per quanto possibile, limitata); le catene devono essere poste in opera con un'adeguata pre-sollecitazione, in modo da assorbire parte dell'azione spingente valutata tramite il calcolo (valori eccessivi del tiro potrebbero indurre danneggiamenti localizzati).

In caso di presenza di lesioni o deformazioni, la riparazione deve consistere in contatti tra le parti separate, onde garantire che il trasferimento delle sollecitazioni interessi una adeguata superficie e consentire una idonea configurazione resistente.

Piattabande ed architravi

Gli architravi sono costituiti da archi in muratura estremamente ribassati, o da un unico elemento in pietra o legno, o spesso in Abruzzo da una combinazione di più sistemi (piattabanda e trave lignea interna; architrave in pietra in facciata e trave lignea nello spessore del muro, ecc.)

La capacità portante dipende da un adeguato sviluppo di un "effetto arco" all'interno della parete stessa, subito al di sopra dell'apertura.

Possono entrare in crisi quando siano interessate da lesioni passanti; gli interventi allora possono consistere in iniezioni di malta tra mattoni distaccati, in collaggio con resina tra le parti in pietra distaccate, inserimento di barre o biette.

Nei casi di maggiore dissesto, o quando si prevedano sensibili incrementi di carico, un rinforzo efficace può ottenersi mediante l'inserimento di una coppia di putrelle, collegate tra loro. Nei casi in cui il dissesto coinvolga anche la muratura immediatamente superiore, si può procedere al rinforzo inserendo delle armature ancorate superiormente nella muratura integra.

Archi e volte

Gli archi e le volte, grazie alla loro forma curva, presentano una notevole capacità portante; le cupole e le volte a vela, grazie alla doppia curvatura, sviluppano al massimo grado la resistenza a compressione. Archi e volte e cupole presentano quindi notevoli riserve di resistenza e possono giungere al collasso o per riduzione quasi totale delle caratteristiche meccaniche del materiale concuisi o realizzate o per considerevoli spostamenti delle imposte, cioè per insufficienza della necessaria contropinta.

Se il problema è la mancanza di contropinta si può intervenire aumentando il carico verticale o la massa delle strutture di sostegno, ricostruendo strutture contro-spingenti in adiacenza (volte precedentemente demolite in ambienti adiacenti a quella della volta che si vuole conservare), aggiungendo speroni esterni o inserendo incatenamenti in acciaio o in legno. L'efficacia delle catene aumenta se all'atto dell'opera vengono messe in tensione, in modo da fornire il contrasto richiesto prima dell'insorgere di ulteriori deformazioni.

Il problema della riduzione delle caratteristiche meccaniche del materiale può insorgere in caso di mancanza di manutenzione e di esposizione agli agenti atmosferici, soprattutto nel caso di volte in conglomerato di pietrame.

Questa situazione è particolarmente pericolosa in caso di volte e cupole molto ribassate, come quelle a sezione ellittica realizzate in età barocca, dove il degrado delle malte può non garantire la necessaria resistenza a taglio nella zona centrale.

Inoltre occorre considerare che un ritiro delle malte (con conseguente caduta di spinta) non adeguatamente preso in conto, può aver ridotto i margini di sicurezza già all'epoca della costruzione. Negli edifici a volte sono spesso molto ribassate, danneggiate da lesioni, da perdite di malta e sono soggette ad incrementi del carico di esercizio; può quindi non essere sufficiente assicurare la spinta alle imposte ed è necessario intervenire sulle volte stesse mediante bonifica dei giunti di malta, iniezioni di malta nelle zone fratturate.

Nel caso delle cupole è spesso necessario rinforzare a trazione (con catene in acciaio o in fibre sintetiche) le linee dei paralleli, dove si producono più facilmente sforzi di trazione superiori alla capacità resistente del materiale di muratura. Più raramente è necessario aggiungere rinforzi lungo i meridiani, per compensare gli effetti flessionali nei piani radiali (questo in genere accade in seguito ad errori nella progettazione originaria, come quando la lanterna è troppo pesante in rapporto alla geometria della cupola).

Per assorbire le spinte di volte e d'archi non deve essere esclusa a priori la possibilità di realizzare contrafforti o ringrossimurari. Questi presentano un certo impatto visivo sulla costruzione e marisultano, per altro, reversibili e coerenti con i criteri di conservazione. La loro efficacia è subordinata alla creazione di un buon ammorsamento con la parete esistente, da eseguirsi tramite connessione discreta con elementi lapidei o in laterizio ed alla possibilità di realizzare una fondazione adeguata.

È possibile il ricorso a tecniche di placcaggio all'estradosso con fasce di materiale composito.

La realizzazione di contro-volte in calcestruzzo o simili, armate o no, è da evitarsi.

Il placcaggio all'intradosso con materiali compositi è efficace se associato alla realizzazione di un sottarco, in grado di evitare le spinte a vuoto, o attraverso ancoraggi puntuali, diffusi lungo l'intradosso.

Placcaggio con fasce di materiale composito si possono applicare sia con resine epossidiche che con matrice cementizia

- da considerare: traspirabilità, durabilità, reversibilità
- nel caso di placcaggio all'intradosso vanno equilibrate le spinte a vuoto

Archi

Si possono prevedere due possibili schemi strutturali:

- schema ad arco, per archi insistenti su imposte fisse;
- schema arco-piedritto, detto schema a portale, per archi insistenti su piedritti.

Generalmente, un arco o un portale collassa per la formazione di almeno quattro cerniere. In particolare, un possibile meccanismo può essere dovuto, ad esempio, alla

formazione di tre cerniere (proprie) ed un doppio pendolo (cerniera impropria) che permette lo slittamento a taglio di una parte dell'arco rispetto all'altra.

Nello schema ad arco, per impedire il meccanismo caratterizzato dalla formazione delle quattro cerniere, di cui due all'estradosso e due all'intradosso, si può intervenire incollando tessuti o lamine di FRP all'estradosso ovvero all'intradosso.

L'intervento di rinforzo sugli archi si esegue preferenzialmente applicando tessuti o lamine di FRP all'estradosso, allo scopo di inibire la formazione di cerniere all'intradosso; in alternativa si possono applicare tessuti o lamine di FRP all'intradosso dell'arco (se non è faccia a vista) per inibire la formazione di cerniere al suo estradosso, ma è meno efficace.

Un'altra pratica possibile consiste nell'applicare il rinforzo sia all'estradosso che all'intradosso dell'arco per prevenire la formazione di cerniere del primo ed del secondo tipo. Tale modalità di applicazione è tuttavia meno frequente.

Tra gli schemi strutturali finalizzati alla determinazione delle caratteristiche della sollecitazione sulla struttura rinforzata, devono essere sempre inclusi quelli che prevedono la formazione di cerniere alle imposte, a meno di non realizzare specifici interventi che ne impediscano la formazione.

- Gli interventi di rinforzo parziali, eseguiti su parte dell'estradosso o dell'intradosso, non escludono la formazione di cerniere responsabili dell'attivazione di un cinetismo; tuttavia, se opportunamente concepiti e realizzati, contribuiscono ad incrementare il valore del carico di collasso.

È consigliabile:

- preferire alle lamine di FRP i tessuti, che meglio si adattano alla geometria del supporto murario;
- applicare, se possibile, il rinforzo sull'estradosso dell'arco; infatti in tal caso, per effetto della curvatura, si mobilitano all'interfaccia arco - FRP tensioni normali di compressione; al contrario, nel caso di un rinforzo teso applicato all'intradosso dell'arco, insorgono all'interfaccia interazioni di trazione, che riducono la resistenza alla delaminazione.

Schema a portale

Nello schema a portale può non essere sufficiente apporre il rinforzo di FRP all'estradosso o all'intradosso dell'arco per impedire il meccanismo ad apertura delle imposte. Occorre in tal caso intervenire sui piedritti oppure disporre un'acatenatura alle imposte.

Volte

Le verifiche da effettuare sono le stesse di quelle previste per lo schema ad arco.

Generalmente, si consiglia di disporre lungo le generatrici una quantità di rinforzo per unità di area pari al 10% di quella disposta lungo la direttrice. La predetta percentuale deve essere innalzata fino al 25% in zona sismica.

Nel caso di volte impiegate in edifici cellulari con vani di modeste dimensioni è opportuno privilegiare l'intervento di rinforzo sulla gabbia muraria e la sua integrità e rigidità, può consentire alla volta di equilibrare i carichi verticali con comportamenti membranali che prevedano un impegno a trazione minimo o nullo. Tale intervento, di norma, consente di evitare o ridurre quello sulla superficie curva della volta.

Volte a doppia curvatura: cupole

In una cupola soggetta a sollecitazioni verticali si instaura un stato tensionale con tensioni normali di trazione dirette lungo i paralleli. Esso è localizzato in prossimità dell'imposta della cupola e si estende in oltre i reperi. La modestissima resistenza a trazione della muratura giustifica il classico quadro fessurativo che frequentemente si instaura nelle cupole: le lesioni si dispongono lungo i meridiani, con l'apice posizionato all'incirca alla metà di questi ultimi, e si estendono fino all'imposta. La fessurazione lungo i meridiani modifica lo stato di equilibrio preesistente mobilitando valori considerevoli della spinta all'imposta, con eventuali ripercussioni sulla sottostante struttura.

L'intervento mediante tessuti circonfenziali di FRP, disposti in prossimità della base della cupola, può servire a contrastare l'estensione della zona fessurata mitigando l'incremento di spinta all'imposta.

Volte a doppia curvatura su pianta quadrata

L'intervento di rinforzo di volte a vela, ovvero volte di traslazione su pianta quadrata, spesso presenti in edifici cellulari con vani di modeste dimensioni, deve innanzitutto interessare la gabbia muraria: l'integrità e la rigidità di quest'ultima consente alla struttura di equilibrare i carichi verticali con stati tensionali di sola compressione.

Se non si ritenga di poter conseguire pienamente il risultato, i rinforzi sulla volta possono limitarsi ai "pennacchi" d'angolo, nei quali la trazione è prevista in direzione ortogonale alle diagonali del vano.

Interventi volti a ridurre l'eccessiva deformabilità dei solai ed al loro consolidamento

I solai devono essere efficacemente collegati alle pareti murarie, attraverso un appoggio sufficientemente ampio ed elementi di connessione che ne impediscano lo sfilamento. Il ruolo dell'isolamento sismico delle costruzioni in muratura è quello di trasferire le azioni orizzontali di loro competenza alle pareti disposte nella direzione parallela al sisma; inoltre essi possono costituire un ulteriore vincolo per le pareti sollecitate da azioni ortogonali al proprio piano, oltre all'ammorsamento con le pareti ortogonali e dai sistemi di collegamento puntuale. Per le suddette ragioni risulta utile un irrigidimento dell'isolamento nel proprio piano, di cui vanno valutate gli effetti, acuisce l'associazione inevitabile a un aumento della resistenza degli elementi. Compatibilmente con il rispetto delle precedenti finalità, è opportuno che l'isolamento strutturale in legno sia il più possibile conservato, anche in considerazione del loro ridotto peso proprio.

Un irrigidimento dell'isolamento, nel caso dell'isolamento ligneo, può essere conseguito operando all'estradosso del tavolato. Una possibilità è fissare un secondo tavolato su quello esistente, disposto con andamento ortogonale o inclinato, ponendo particolare attenzione ai collegamenti con i murilaterali; in alternativa, o in aggiunta, si possono usare rinforzi con bande metalliche, o di materiali compositi, fissate al tavolato con andamento incrociato. Un analogo beneficio può essere conseguito attraverso un controventamento realizzato con tiranti metallici. Nel caso di solai a semplice orditura, dovrà essere curato il collegamento con le pareti parallele alle travi, realizzandolo, ad esempio, con bande fissate al tavolato ed ancorate nella muratura.

Nei casi in cui risultino necessari un consolidamento statico del solaio per le azioni flessionali, è possibile, con le tecniche legno-legno, limitare la deformabilità flessionale ed aumentare la resistenza con un secondo tavolato, utilizzando, ortogonalmente rispetto al tavolato esistente, dei nuovi tavoli continui, resincolaboranti alle travi mediante perni anche di legno.

Nel caso di solai a travi in legno e pianelle di cotto, se viene dimostrato l'insufficiente resistenza nel piano, possono essere adottati interventi di irrigidimento all'estradosso con sottili calcestruzzi alleggeriti, opportunamente collegate alle murature perimetrali ed alle travi in legno.

Nel caso di solai a struttura metallica con interposti elementi in laterizio (putrelle e voltine o tavelloni), può essere necessario collegare i travi o i profilati dandole bande metalliche trasversali, poste all'intradosso o all'estradosso.

Fattori condizionanti la scelta della tipologia di consolidamento:

- Caratteristiche tipologiche degli elementi strutturali

- Geometria degli elementi strutturali
- Rilevanti carichi di esercizio
- Esigenza di incrementare la resistenza delle orditure lignee
- Necessità di diminuire la deformabilità del solaio
- Mantenimento di tutti gli elementi lignei
- Compatibilità dei materiali per il rinforzo con quelli esistenti

Interventi sulle strutture murarie verticali

Il materiale “muratura” presenta una resistenza a trazione (e taglio) decisamente scarsa; di questo sono sempre stati consapevoli i costruttori e i progettisti del passato, che infatti hanno sviluppato concezioni strutturali che si basano su esecuzioni migliori della resistenza a compressione nei pilastri, negli archi, nelle volte, negli archi di scarico inseriti nella pareti, ecc.

Le tecniche costruttive hanno sempre tenuto anche conto dell’anisotropia delle murature in mattoni o in blocchi quadrati ben apparecchiati: la maggior resistenza a trazione in direzione parallela ai ricorsi di mattoni e, viceversa, la maggior resistenza a compressione in direzione ortogonale ai medesimi ricorsi di mattoni.

Per migliorare la resistenza a trazione sono spesso state impiegate, nei decenni passati, delle iniezioni armate con elementi metallici o sintetici. Le iniezioni armate comunque devono oggi rappresentare un intervento eccezionale, limitato a zone particolari (come talune giunzioni tra pareti) ed attentamente verificate come compatibilità sia per quanto riguarda il carattere storico dell’opera, sia per le alterazioni che la nuova rigidità composta nel contesto strutturale.

In caso di azioni sismiche, può essere (ed in genere è) comunque necessario un “miglioramento” delle caratteristiche meccaniche intrinseche del materiale “muratura”. È possibile migliorare il materiale “muratura” migliorando le caratteristiche meccaniche della malta per mezzo di iniezioni con malte idrauliche compatibili con quelle originarie (“rigenerazione della compagine muraria”).

Le malte da iniezione devono essere anti ritiro e condensità/fluidità funzione della muratura da iniettare: malte più dense (“boiacche”), nel caso di muratura con molti vuoti allora internoper assenza o perdita della malta originaria; malte superfluidedove bisogna penetrare in piccole fratture ed dove bisogna “rigenerare” una vecchia malta

ancora in situ ma degradata e senza più capacità legante. In questo caso la malta superfluida deve essere in grado di infiltrarsi nelle porosità della malta degradata, imbibendola. Le malte più compatibili con le malte storiche sono in genere le malte a base pozzolanica, mentre devono essere escluse quelle a base di cemento (malte di cemento tipo portland). Una buona qualità della compagine muraria è necessaria per garantire l’efficacia degli interventi di incatenamento ed controventamento, in relazione alla corretta funzionalità degli ancoraggi. Ne consegue quindi che in genere la rigenerazione muraria è propedeutica a tutti gli altri interventi, sia quelli inerenti il comportamento globale che quelli riguardanti i rinforzi locali.

Pareti e pilastri

Il metodo tradizionale per incrementare la capacità portante dei pilastri, oltre ad una eventuale rigenerazione delle malte mediante iniezioni, consiste in cerchiature circolari atte a contrastare l’espansione laterale; un’alternativa meno efficace consiste nell’utilizzare cerchiature radiali realizzate mediante iniezioni armate (l’efficacia del contrasto laterale si perde alle estremità delle barre, avvenendo la trasmissione degli sforzi per aderenza). Il beneficio della staffatura è in ogni caso maggiore se le staffe vengono pretese.

In caso di azioni sismiche gli elementi che giocano il ruolo principale sono le pareti, mentre i pilastri in muratura, nei quali si generano facilmente delle cerniere plastiche alle due estremità trasformandoli in “pendoli” verticali, non sono in grado di fornire contributi sostanziali nel contrasto alle azioni orizzontali.

Quando in una parete non presentidei danni, gli interventi possono essere suggeriti dai danni stessi e in particolare dal quadro fessurativo. Viceversa, se il progetto ha lo scopo di prevenire il danneggiamento, è necessaria una analisi preliminare per individuare, all’interno di una parete, quale tra il meccanismo resistente di tipo “flessionale” e quello di tipo “taglio” sia il più debole, tenendo conto che in taluni casi occorre rinforzare entrambe i meccanismi.

Come accennato, sono le pareti ad aver resistere alle azioni sismiche e in particolare devono essere in grado di contrastare la componente dell’azione sismica che agisce parallelamente all’orizzonte principale (mentre la componente ortogonale ad una data parete deve essere assorbita dalle pareti ad essa ortogonali). Il miglioramento del

comportamento strutturale e sismico di una singola parete può essere quindi tarato e gradualmente incrementato secondo la seguente gerarchia di interventi:

a) assicurare la solidità della parete a livello di materiale (iniezioni per la rigenerazione delle malte, se necessario) edell'insieme, cercandodi eliminare le zone di debolezza dovute a modifiche emanate nel passato (nicchie, tracce per impianti, vani) evitando al contempo, di indebolire la struttura con nuovi carotaggi e fori, nell'attuare gli interventi descritti nei punti successivi: se bisogna realizzare un incatenamento parallelamente al piano principale di una parete è bene non disporre una sola catena in asse alla parete stessa (previo relativo carotaggio), ma sdoppiare l'intervento in due catene di sezione equivalente (equindi di diametro inferiore), disposte esternamente ed in aderenza sulle due facce della parete medesima; anche gli alloggiamenti delle teste delle travi e isolai, specialmente quelli di legno, rappresentano punti di debolezza che devono essere accuratamente verificati e consolidati, nonché, se necessario, richiusi realizzando l'appoggio delle travi su mensole o su correnti (in legno o acciaio) posti in aderenza e fissati nel modo meno invasivo;

b) migliorare il comportamento "flessionale e a taglio" rinforzando i pannelli orizzontali a livello dei isolai ("fascia di piano"); occorre infatti tener conto che per migliorare il comportamento strutturale di una parete per azioni orizzontali agenti parallelamente al proprio piano principale è sempre bene passare da un meccanismo resistente d'insieme di tipo flessionale a un meccanismo di tipo taglio; questo si ottiene incrementando la rigidità flessionale delle fasce di piano; negli anni ottanta sono stati impiegati a questo scopo cordoli di piano in cemento armato, che però sono incompatibili con le malte storiche e se sono spessi e rivestiti poco efficaci, per non dire dannosi. In catenamenti orizzontali pretesi possono sostituire i cordoli in c.a. e possono essere realizzati con barre in acciaio, profili in acciaio o correnti in legno; nel caso dei profili in acciaio e dei correnti in legno vanno previste degli ancoraggi pretesi alle estremità e poi degli ancoraggi alla muratura in più punti lungo tutta la loro lunghezza;

c) migliorare il comportamento a "taglio" rinforzando i pannelli di muratura compresi tra le porte e le finestre di un medesimo piano (i "maschi murari"): quando non è sufficiente passare dal meccanismo resistente d'insieme di tipo flessionale a quello di tipo taglio, oltre ad eventualmente rinforzare a flessione i pannelli

verticali più snelli, come visto al punto precedente, diventa necessario rinforzare a taglio i pannelli verticali più tozzi; questo è un lavoro delicato poiché generalmente sono richiesti interventi relativamente invasivi; nel passato, ma anche nei manuali più recenti, è stato impiegato il placcaggio con la stredic.a. sulle due facce opposte del pannello murario; si tratta di un intervento non molto efficace (soprattutto se non si è anche provveduto alla rigenerazione muraria), non compatibile con edifici di valore storico e comunque non eseguibile nel caso di murature faccia a vista; oggi al posto di la stredic.a. (peraltro chimicamente non compatibile con le malte storiche) si preferisce un placcaggio con malte pozzolaniche fibrorinforzate e armate con reti in fibra aramidica o pvc, disponendo anche, se necessario, strisce di rete di rinforzo lungo diagonali di ciascun pannello murario; l'intervento è reso più efficace collegando i placcaggi sulle due facce del pannello mediante staffe trasversali, sempre in fibra sintetica, per conferire anche un adeguato confinamento trasversale; in questo tipo d'intervento il miglioramento deriva dal confinamento della muratura, più che da un incremento della sezione resistente;

d) migliorare il comportamento flessionale della parete: se l'incremento di capacità portante ottenuto passando dal meccanismo resistente d'insieme di tipo flessionale a quello di tipo taglio non è sufficiente, può essere necessario anche migliorare il comportamento flessionale dell'intera parete e/o dei singoli pannelli verticali; si tratta in questo caso di andare a contrastare il ribaltamento (nel piano della parete) e a questo fine diventa quindi necessario eliminare le trazioni verticali; a tal fine possono essere previste cavi barre verticali, eventualmente pretesi, posti alle estremità delle pareti di ciascuna parete;

e) migliorare la possibilità di sviluppo di un "effetto arco", interno allo spessore della parete, nel caso di azioni orizzontali ortogonali alla parete medesima; le zone più deboli sono quelle prossime agli angoli e nei piani superiori, dove il contrasto alla spinta fornita dall'effetto arco può essere insufficiente, rispettivamente in direzione orizzontale o in direzione verticale; può quindi essere necessario l'inserimento di incatenamenti a loro volta rispettivamente in direzione orizzontale o verticale.

L'azione sismica non comporta normalmente problemi alla capacità portante dei isolai (se non sono degradati e/o insufficienti per altre ragioni), data l'amplificazione generalmente ridotta delle componenti verticali del moto del terreno, mentre le forze

orizzontali coinvolgono queste strutture nell'oropiano principale, dove possiedono una maggiore rigidità e resistenza. Ad ogni modo è importante evitare movimenti relativi tra pareti portanti e nodi di collegamento. È quindi fondamentale collegare i travetti alle pareti, mediante ancoraggi in acciaio o in fibra sintetica.

Interventi in copertura

Per le coperture valgono considerazioni analoghe a quelle dei solai, tenendo conto delle spinte chealcune tipologie di tetti a falda possono esercitare sulle pareti. L'inserimento di cordoli in muratura armata in legno, sul colmo della muratura, è un intervento strutturalmente valido, per il comportamento strutturale d'insieme, ma occorre caso per caso valutarne la fattibilità in relazione alle caratteristiche architettoniche dell'opera.

Il rinforzo dei tetti spingenti richiede in genere l'inserimento di catene trasversali, disposte alla quota d'imposta del tetto; alla stessa quota possono essere disposti controventi orizzontali sempre realizzati con tiranti in acciaio, per il miglioramento del comportamento scatolare d'insieme. Anche le falde dei tetti possono essere irrigidite nel loro piano con la stessa metodologia vista per i solai in legno.

È in linea generale opportuno il mantenimento dei tetti in legno, per evitare incrementi alle masse poste in sommità dell'edificio (come invece succede inserendo coperture in latero-cemento) ed al contempo evitare l'inserimento di elementi (come cordoli in c.a. di contorno ai medesimi tetti in latero-cemento) eccessivamente rigidi rispetto alla compagine muraria sottostante.

In generale, vanno il più possibile sviluppati i collegamenti e le connessioni reciproche tra la parte terminale della muratura e le orditure e gli impalcati del tetto, ricercandole configurazioni e le tecniche compatibili con le diverse culture costruttive locali. Oltre al collegamento con capochiave metallico, che impedisce la traslazione, si possono realizzare cordoli-tiranti in legno o in metallo opportunamente connessi sia alle murature sia alle orditure in legno del tetto (cuffie metalliche), a formare al tempo stesso un elemento di connessione sul bordo superiore delle murature e un elemento di ripartizione dei carichi concentrati delle orditure del tetto. Vanno in generale evitati i cordoli in cemento armato, per la diversa rigidità che essi introducono nel sistema strutturale, per la conseguente modifica nella distribuzione delle masse e per l'invasività dal punto di vista storico architettonico ed l'incompatibilità chimica spesso presente. Ove i tetti presentino orditure spingenti, come nel caso di puntoni inclinati privi di semicatene in piano, la spinta deve essere compensata andando a posizionare le catene "mancanti".

Nel caso delle capriate, deve essere presente un buon collegamento nei nodi, necessario ad evitare scorrimenti e distacchi in presenza di azioni orizzontali: oltre a verificare le zone d'appoggio è opportuno prevedere dispositivi di appoggio/ancoraggio alla muratura sottostante.

Interventi sui elementi non strutturali

In una costruzione vi sono diversi elementi, così detti secondari dal punto di vista strutturale, quali i cornicioni, i cornicioni, le gronde, le lastre di rivestimento delle facciate e così via, che però sono comunque importanti per l'incolumità delle persone.

In particolare le lastre di rivestimento si possono staccare con una certa facilità dalle pareti in muratura dissetata, anche in relazione all'invecchiamento delle malte ed all'ossidazione delle staffe o grappe di collegamento.

Gli interventi, ed in particolare in zona sismica, consistono essenzialmente nel ristabilire un collegamento efficace utilizzando tecniche appropriate, come l'inserimento di chiodi, di grappe, di staffe, ecc.; questi possono essere integrate, ed in alcuni casi anche sostituite, da malte o colle speciali.

Interventi in fondazione

L'inadeguatezza delle fondazioni è molto raramente la sola o la principale causa dei danni osservati dopo un terremoto. È possibile mettere gli interventi sulle strutture di fondazione, nonché le relative verifiche, qualora si riscontrino le seguenti condizioni:

- non siano presenti significativi dissesti attribuibili a cedimenti in fondazione e sia stato accertato che dissesti di questa natura non si siano verificati neppure in passato;
- gli interventi progettati sulla struttura in elevazione non comportino sostanziali alterazioni dello schema statico del fabbricato;
- gli stessi interventi non comportino rilevanti modifiche delle sollecitazioni trasmesse alle fondazioni;
- siano escluse le fenomeni di ribaltamento della costruzione per effetto delle azioni sismiche.

Nei casi in cui le indagini e le analisi mettano in evidenza la necessità di un intervento in fondazione, l'intervento stesso dovrà mirare alla massima uniformità delle condizioni di appoggio al fine di ottenere una distribuzione il più possibile uniforme delle pressioni di contatto. Al fine, in generale, sono da privilegiare gli interventi di ampliamento della base fondale con sottomurazioni, rispetto al ricorso a pali di piccolo diametro ad altre

tecniche di consolidamento localizzato del terreno quali trattamenti a colonna con jet grouting o deep mixing.

Nelle situazioni in cui si ritiene possibile l'attivazione sismica di fenomeni di instabilità del pendio, il problema deve essere affrontato agendo sul terreno e non al livello delle strutture di fondazione.